



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

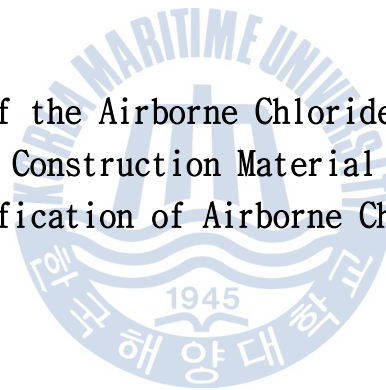
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

비래염분 정량화에 의한 건축마감재의 표면염화물량 산정

Calculation of the Airborne Chloride Amount on the
Surface of Construction Material through the
Quantification of Airborne Chlorides



지도교수 박 동 천

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

해 양 건 축 공 학 과

조 규 환

본 논문을 조규환의 공학박사 학위논문으로 인준함.



위원장	송 화 철	(인)
위 원	박 수 용	(인)
위 원	김 영 수	(인)
위 원	김 우 재	(인)
위 원	박 동 천	(인)

2014년 12월 12일

한국해양대학교 대학원

목 차

표 목차	iv
그림 목차	v
Abstract	ix

1. 서 론

1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 목적	3
1.3 논문의 구성	5
1.4 국내외 연구동향	8

2. 비래염분 정량화를 위한 시험장치 개발

2.1 개론	17
2.2 축진 비래염분 시뮬레이터	21
2.2.1 시뮬레이터의 구성	21
2.2.2 성능 검증	25
2.3 비래염분 포집기	29
2.3.1 포집기별 성능 및 문제점	29
2.3.2 포집기 개발 및 검증	34
2.3.3 다방향 포집기	43
2.4 소결	45

3. 해안지역 대기 중의 비래염분 정량화

3.1 개론	47
3.2 실험 개요 및 방법	48
3.2.1 비래염분 측정 결과	52
3.2.2 바람의 발생빈도와 풍속 관측	54
3.2.3 기상월보의 관측자료	56
3.3 포집 결과 및 분석	57
3.3.1 비래염분의 분포특성	57
3.3.2 거리와 높이에 따른 비래염분 정량화	63
3.3.3 기상조건과 비래염분의 상관성	64
3.3.4 바람의 발생빈도와 풍속에 따른 비래염분 정량화	75
3.4 소결	77

4. 대기 중 비래염분량과 건축마감재별 부착 비래염분량의 관계

4.1 개론	79
4.2 실험 개요 및 방법	80
4.2.1 건축마감재별 비래염분의 부착	84
4.2.2 바람의 입사각에 의한 비래염분의 부착	85
4.2.3 강우에 의한 비래염분의 유실	86
4.3 실험 결과 및 분석	87
4.3.1 건축마감재별 부착율	87
4.3.2 입사각에 따른 부착율	92
4.3.3 세정작용에 의한 유실을	95
4.4 소결	99

5. 부착 비래염분량에 따른 강재마감별 부식 저항성 평가

5.1 개론	101
5.2 실험 개요 및 방법	102

5.2.1 시료의 선정	102
5.2.2 부식 시험	105
5.3 실험 결과 및 분석	109
5.3.1 촉진 비래염분 환경의 강제 부식	109
5.3.2 자연 폭로에 의한 강제 부식	115
5.4 소결	122
 6. 결 론	 125
 참고문헌	 129
 감사의 글	 137
 부록	
A. 유사 비래염분 시뮬레이터	141
B. 비래염분 데이터	145

표 목차

[표 1-1] 대기 중 비래염분과 부착 비래염분의 관계	12
[표 1-2] 국내외 연구수준의 비교	16
[표 2-1] 각종 부식환경 촉진시험 조건	18
[표 2-2] 포집기별 특징 분류	33
[표 3-1] 비래염분 포집 위치의 지리조건	48
[표 3-2] 다방향 비래염분 데이터	53
[표 3-3] 풍향풍속계의 제원	54
[표 3-4] 관측된 기상데이터와 측정된 비래염분 데이터의 변환	55
[표 3-5] 기상일보의 데이터와 측정된 비래염분 데이터의 변환	55
[표 3-6] 기상일보에 기록된 기상데이터	56
[표 3-7] 포집방식에 따른 거리별 비래염분 분포식	60
[표 3-8] 포집방식에 따른 높이별 비래염분 분포식	62
[표 3-9] 다중회귀 분석 통계량 요약	76
[표 3-10] 다중회귀 분석 계수	76
[표 4-1] 실험인자 및 실험조건	81
[표 4-2] 모르타르 시편의 배합	83
[표 4-3] 건축마감재별 부착계수	90
[표 5-1] 스테인리스의 조성	104

그림 목차

[그림 1-1] 연구의 목적	6
[그림 1-2] 연구 순서	7
[그림 1-3] 비래염분량과 표면염화물량의 관계	12
[그림 1-4] 비래염분 전달과정의 분류	15
[그림 2-1] 촉진 비래염분 시뮬레이터	22
[그림 2-2] 촉진 비래염분 시뮬레이터(측면도)	22
[그림 2-3] 시편거치대(정면도)	23
[그림 2-4] 촉진 비래염분 시뮬레이터(단면도)	23
[그림 2-5] 인공 비래염분 발생장치	24
[그림 2-6] 건식거즈 포집기가 설치된 시편거치대	25
[그림 2-7] 시뮬레이터 내부 단면 16부분의 비래염분량	26
[그림 2-8] 시뮬레이터 내부 단면 16부분의 평균 풍속	27
[그림 2-9] 시뮬레이터 내부 단면 16부분에서 재 측정된 비래염분량	28
[그림 2-10] 뒷면의 바람에 의한 부착된 비래염분의 탈락	30
[그림 2-11] 포집기의 종류	31
[그림 2-12] [K1], [K3]-Type 포집기	33
[그림 2-13] 포집기별 비래염분 포집율의 비교	34
[그림 2-14] [Upgrade JIS]-Type 포집기	35
[그림 2-15] [Back Plate ①]-Type 포집기	36
[그림 2-16] [Back Plate ②]-Type 포집기	36
[그림 2-17] 8방향 포집이 가능하도록 설치된 포집기	37
[그림 2-18] 포집기별 다방향 비래염분 데이터(7월, 8월, 9월)	38
[그림 2-19] [Upgrade JIS]-Type 포집기의 내부 풍속변화	39

[그림 2-20] [Back Plate ①, ②]-Type 포집기의 내부 풍속변화	40
[그림 2-21] [Open Close]-Type 포집기	41
[그림 2-22] 개선 포집기별 비래염분 포집량	42
[그림 2-23] [Open Close]-Type 포집기(상세도)	42
[그림 2-24] 다방향 포집기(상세도)	44
[그림 3-1] 비래염분 포집 위치(대한민국, 부산, 인천)	49
[그림 3-2] 비래염분과 기상조건의 상관분석을 위한 실험과정	51
[그림 3-3] 비래염분 포집과 기상관측	52
[그림 3-4] 풍향풍속계(Anemovane)	54
[그림 3-5] 월별 비래염분 분포(8방향 평균)	57
[그림 3-6] 계절별 비래염분 분포(8방향 평균)	58
[그림 3-7] 전체 8방향 평균, 유효 3방향 평균과 비유효 3방향 평균 비 래염분량 비교(1월~12월 각 방향별 평균)	59
[그림 3-8] 거리별 비래염분의 분포	60
[그림 3-9] 높이별 비래염분의 분포	62
[그림 3-10] 거리와 높이에 따른 비래염분 분포 예측	64
[그림 3-11] 바람의 발생빈도와 비래염분(풍향풍속계 사용)	65
[그림 3-12] 바람의 발생빈도와 비래염분의 상관성(풍향풍속계 사용)	66
[그림 3-13] 방향별 바람의 발생빈도와 비래염분(기상월보 사용)	67
[그림 3-14] 바람의 발생빈도와 비래염분의 상관성(기상월보 사용)	68
[그림 3-15] 풍속과 비래염분(풍향풍속계 사용)	69
[그림 3-16] 풍속과 비래염분의 상관성(풍향풍속계 사용)	70
[그림 3-17] 월별 풍속과 비래염분(기상월보 사용)	71
[그림 3-18] 풍속과 비래염분의 상관성(기상월보 사용)	72
[그림 3-19] 월별 강우량과 비래염분(기상월보 사용)	73
[그림 3-20] 강우량과 비래염분의 상관성(기상월보 사용)	74
[그림 3-21] 실험조건(실환경, 기상월보)별 바람의 발생빈도 및 풍속과 비래염분의 상관성	75

[그림 4-1] 건식거즈가 적용된 비래염분 포집기	82
[그림 4-2] 재료별 시편의 도식 및 규격	83
[그림 4-3] 시편의 종류	83
[그림 4-4] 산술평균 거칠기 도출의 예시	84
[그림 4-5] 구조물 배치에 따른 입사각 변화	85
[그림 4-6] 강우재현 장치(살수장치)	86
[그림 4-7] 건축마감재별 부착 비래염분량	87
[그림 4-8] 건축마감재별 비래염분의 부착율과 표면 거칠기	91
[그림 4-9] 표면 거칠기와 비래염분 부착율의 관계	91
[그림 4-10] 입사각 변화에 따른 부착 비래염분량 변화	93
[그림 4-11] 입사각에 따른 비래염분의 부착율	95
[그림 4-12] 강우(살수)에 의한 비래염분의 유실을	96
[그림 4-13] 건축마감재별 세정에 따른 비래염분의 유실계수	98
[그림 5-1] 각 마감방식의 강재 시편	103
[그림 5-2] 촉진 부식시험의 과정	105
[그림 5-3] 부착된 비래염분의 채취	106
[그림 5-4] 촉진 부식을 위한 온습도 사이클	107
[그림 5-5] 자연폭로 부식시험의 과정	108
[그림 5-6] 폭로 부식시험 전경	108
[그림 5-7] 부착 비래염분량에 따른 무도장의 부식 저항성	110
[그림 5-8] 부착 비래염분량에 따른 우레탄도장의 부식 저항성	110
[그림 5-9] 부착 비래염분량에 따른 광명1단도장의 부식 저항성	111
[그림 5-10] 부착 비래염분량에 따른 불소도장의 부식 저항성	112
[그림 5-11] 부착 비래염분량에 따른 스테인리스201의 부식 저항성	112
[그림 5-12] 무도장의 부식속도	113
[그림 5-13] 우레탄도장의 부식속도	114
[그림 5-14] 광명1단도장의 부식속도	114
[그림 5-15] 스테인리스201의 부식속도	115

[그림 5-16] 광명1단, 2단, 3단도장의 부식상태	116
[그림 5-17] 무도장, 우레탄도장, 불소도장의 부식상태	117
[그림 5-18] 스테인리스201, 304, 316의 부식상태	118
[그림 5-19] 스테인리스430의 부식상태	119
[그림 5-20] 폭로 부식시험 기간 중의 기상조건	120
[그림 5-21] 폭로 부식시험 결과(비례염분량 비교)	121



비래염분 정량화에 의한 건축마감재의 표면염화물량 산정

Cho, Gyu Hwan

Department of Architecture and Ocean Space
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Airborne chlorides composed of chloride ions cause salt damage, one of the factors of corrosion, on steel structures in the oceanic area, which deteriorates the overall strength of the structure. To prevent this problem, diverse types of finishing materials are applied on the structure's surface, and the penetration of airborne chlorides is thus prevented. However, the finishing materials are so diverse that the amount of airborne chlorides that actually adhere to the surface is considerably different from that of chlorides in the air; for this reason, it is difficult to select a proper finishing material that achieves the optimal integrity performance. Therefore, to quantify the airborne chloride amount in the oceanic area, which is considered an extreme salt environment, a multi-direction collector was used, and

the equation of the chloride amount in the air according to the locational condition and the surrounding climatic condition was quantified. Also, by comparing the chloride amount in the air with that of airborne chlorides attached on each of the finishing materials for a structure, the quantified chloride amount in the air was converted into the airborne chloride amount attached on each of finishing materials. In addition, the corrosion according to the airborne chloride amount attached on the steel with each finishing material was identified to evaluate the resistance of each finishing material to the corrosion caused by the airborne chlorides.

1. Quantification of the external environment load (airborne chlorides in the air) was performed.

To analyze the distribution characteristics of the surrounding airborne chlorides according to the locational condition, a multi-direction (eight direction) collector was developed to measure the airborne chloride amount from eight directions on the basis of the location of the structure. The collector was actually applied in an oceanic environment, and the distribution characteristics of airborne chlorides were evaluated by direction and by season. The quantified equation of airborne chlorides was derived in consideration of the distance from the seashore and the height above the surface of the sea. In addition, as the flow of the wind is a dominant factor in the transfer of airborne chlorides, the transfer characteristics of airborne chlorides were analyzed according to the wind frequency and the wind speed, and the quantified equation was derived. If the quantification process of this study is applied, the chloride amount in the air surrounding the structure being built in the oceanic area can be estimated.

2. The relationship between the airborne chloride amount attached on the structural surface with the chloride amount in the air was determined for each finishing material.

The value derived from the aforementioned quantification was used as an indication for the chloride amount in the air, which can be slightly different from the airborne chloride amount actually attached on the structural surface. For this reason, an accelerated airborne chloride simulator in an artificial environment was used to analyze the airborne chloride amount attached on the structural surface for each finishing material. Through this, the correlation that shows the difference in the chloride amount in the air and the airborne chloride amount attached on each finishing material was derived. In addition, the airborne chloride amount lost(cleansed) in a rainfall was reviewed. This process is believed to be useful in the calculation of the airborne chloride amount, a boundary condition for the durability design against chloride-induced corrosion.

3. The resistance against corrosion of each finishing material based on the airborne chloride amount attached on each finishing material was evaluated.

In order to prevent the salt damage of structures by airborne chlorides, the penetration of airborne chlorides was blocked by applying material with good resistance to salt damage. However, finishing methods are diverse, making it difficult to select an appropriate finishing material for a salt environment, extreme or moderate, and there is confusion regarding which finishing material is appropriate for which place. As such, the accelerated corrosion test and exposure corrosion test should be performed to review the

resistance against corrosion according to the airborne chloride amount attached for each finishing material, and the resistance to salt damage evaluated. In this way, the airborne chloride amount can be estimated in the area where airborne chlorides were found in the air, and it is believed that an appropriate finishing material can be selected and its optimal performance achieved.

The airborne chloride amount was found to be slightly different depending on the locational condition and weather condition surrounding the structure by region, but it can be quantified using the multi-direction collector developed in this study. The values derived through this quantification can be converted into the airborne chloride amount attached on each finishing material. In addition, by reviewing the resistance to corrosion by finishing material according to the attached airborne chloride amount, it is expected that an optimal finishing material with resistance to corrosion can be selected for the area where the airborne chloride amount was investigated.

KEY WORDS: Airborne chlorides 비래염분; Multi-direction collector 다방향 포집기; Acceleration airborne chlorides simulator 촉진 비래염분 시뮬레이터, Construction finishing material 건축마감재; Corrosion 부식

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

최근 전 세계적으로 해양자원에 대한 관심이 증대되면서 효율적인 개발을 위한 노력들이 다방면에서 이루어지고 있다. 특히, 해양과의 접근성을 높이려는 시도는 해양의 물질자원 및 공간자원의 개발을 극대화하는데 반드시 필요한 사항 중 하나로, 건축, 토목, 중공업, 해양플랜트 등의 다양한 해양산업 기반시설들이 이러한 요구조건을 충족시키기 위해, 해양과 근접하는 입지조건에서 건설되고 있다. 하지만 이와 같은 환경에 건설된 구조물들은 지리적인 특성상 염해의 발생 가능성이 높아 대책 마련이 반드시 필요하다. 특히, 바다와 인접하는 해안지역의 대기 중에는 상당한 수의 비래염분¹⁾이 분포하고 있으며 이들이 각종 구조물의 표면에 부착될 경우, 강재부식으로 인한 염해를 유발하기도 한다. 따라서 해안지역에 건설되는 구조물들은 염해를 방지하기 위해 적절한 내염설계를 실시해야 하며, 적재적소의 재료·공법 선정 및 대책수준 책정을 위해서는 외부 환경 부하량(대기 중의 비래염분량)의 평가 및 표면염화물량(부착 비래염분량) 산정이 필수적이다. 하지만 대기 중의 비래염분은 발생시점부터 내륙으로 전달되어 구조물의 표면에 도달하기까지 다양한 외부 환경조건들에 의해 그 양이 지속적으로 변동되므로 정량적인 값을 산정하는데 어려움이 많다. 발생시점의 비래염분은 해안의 형태(암초해안, 모래사장), 파랑에너지 등에 의해 발생량의 다소가 결정되며, 내륙으로 전달되는 과정에서의 전송시점 비래염분은 지리적인 조건인 계절, 방향, 거리, 높이, 기후적인 조

1) 해수면에서 발생하는 기포가 파열될 때 비산되는 약 3~18 μ m 크기의 미립자(大郎信明 外, 1987)

건에서는 바람의 발생빈도, 풍속, 강우 등에 의해 그 양이 변동되며, 마지막으로 구조물 표면에 부착되는 도달시점 비래염분은 구조물 표면의 형태(마감재 종류), 해풍의 유입각도, 강우의 발생으로 인한 세정작용 등, 다양한 외부 환경조건에 의해 그 양이 달라진다. 따라서 해안지역에 위치한 구조물의 염해 위험성을 정확히 평가하기 위해서는 이러한 대기 중 비래염분의 분포 및 유동특성을 명확히 규명해야 한다.

다양한 조건에 따라 대기 중에 분포하고 있던 비래염분이 철근콘크리트 구조물의 표면에 부착될 경우(이철민, 2005; 이승철, 2007; 佐伯龍彦 外, 2007; 青木慶彦 外, 2010), 공극구조를 가지는 콘크리트의 특성상 내부로 침투한다(Maruya, et al., 1989; Andrade, 1993; Anna, et al., 1993). 침투된 비래염분은 보강철근의 부식을 유발, 이는 곧 피복콘크리트의 균열 및 박락으로 이어져 구조물의 내구성에 심각한 영향을 미치게 된다. 이에 보강철근의 부식을 예방하기 위해 비래염분의 침투과정을 분석한 예측식이 다수 제안되고 있으며, 그 중에서도 Fick의 제 2법칙에 의해 유도된 방정식은 공극구조를 가지는 물질 내부에서 염화물이온이 시간의 경과에 따라 확산되어 가는 과정을 나타낸 것이다(Collepardi, et al., 1972). 하지만 방정식을 활용하기 위해서는 경계조건이 되는 표면염화물량 산정이 중요하나 건축마감재의 종류, 구조물 표면으로의 해풍의 유입각도 및 강우에 의한 세정작용 등, 다양한 영향인자로 인해 대기 중의 비래염분량에 비해 실제 구조물 표면에 부착되는 비래염분량이 상이하므로 정량적인 값을 산정하는데 어려움을 겪고 있다.

한편, 강 구조물의 경우, 비래염분으로 인한 강재부식을 예방하기 위해 구조물의 표면에 각종 마감재를 시공하여 1차적인 열화인자의 접촉을 사전에 차단하고 있다. 하지만 해안지역과 같이 극한 염해환경에 장시간 노출될 경우, 열화 및 노화로 인한 마모, 모재와의 박리 등, 마감재가 가지는 고유한 방식(차염)성능이 점진적으로 상실될 우려가 있다. 또한 마감방식이 매우 다양한 관계로, 염해환경의 강약에 따른 적절한 마감재 선정에 혼란을 초래하고 있다.

따라서 극한 염해환경에 위치한 구조물의 장수명화를 위해서는 먼저, 내염설계 대상이 되는 구조물에 영향을 미치는 외부 환경부하에 대한 검토가 필요하다. 특히, 해양환경에 건설되는 구조물의 경우, 다양한 염해를 발생시키는 부정적인 요인들에 직접적으로 노출되어 있지만 지역별 열화 요인들에 대한 정량적인 파악이 이루어지지 않은 상태이다. 하지만 내구성 측면에서의 재료의 선정 즉, 염해를 방지하는 차원에서의 적정 마감재 선정을 대상 구조물 주변 환경부하의 정량적인 검토를 바탕으로 실시한다면 기존 구조물의 내구성 증진에 따른 재건설 비용, 유지관리 비용 등의 절약을 추구할 수 있어 경제적 이득효과를 가져올 것으로 생각된다.

1.2 연구의 목적

염화물이온으로 구성되어 있는 비래염분은 해안지역에 위치한 철근콘크리트 및 강 구조물의 표면에 부착되어 보강철근 및 구조용 강판의 부식을 유발한다. 이에 비래염분 실측조사를 바탕으로 외부 환경부하량을 계산하는 등, 부식을 방지하기 위한 다양한 노력들을 기울이고 있으나 비래염분은 해풍과 함께 내륙으로 전달되는 것으로, 지리, 기후적인 영향을 크게 받고 있어 정량적인 값 산정에 어려움이 많다. 또한 대기 중의 비래염분량에 비해 실제 구조물 표면에 부착되는 양이 상이하여, 내염설계를 위한 표면염화물량 산정이 어려운 관계로, 최적 방식(차염)성능 확보를 위한 마감재 선정에 혼란을 초래하고 있다. 따라서 본 연구에서는 대기 중 비래염분의 정량화를 실시, 이 값을 기준으로 각종 건축마감재에 부착되는 비래염분량(표면염화물량)을 산정하고자 한다. 또한 각종 마감재를 적용한 강재의 부식정도를 파악하여, 마감재별로 부착 비래염분량에 따른 방식(차염)성능을 평가하고자 한다. 이는 대기 중의 비래염분량이 확인된 지역에 건설되는 구조물에 대해, 최적의 방식(차염)성능 확보를 위한 마감재 선정 프로세스에 중요한 참고자료가 될 것으로 생각된다. 이와 같은 목적을 위해 수행한 연구는 아래와 같다.

외부 환경부하(대기 중 비래염분)의 정량화를 실시하고자 한다.

비래염분은 내륙으로 전달되는 과정에서 다양한 주변 환경조건들로 인해 그 양이 달라진다. 환경조건으로는 거리, 높이, 풍향, 풍속, 비래염분 전달의 방해물 배치 상태 등, 지역별로 지리적인 조건과 기후적인 조건 등에 의해 비래염분량이 변화하게 된다. 우선, 비래염분 실측값을 바탕으로 주변 환경조건들을 고려한 정량화를 실시한 후, 이를 대상 구조물 표면에 부착되는 비래염분량으로 변환해야 열화인자의 경계조건 값으로 활용할 수 있게 되어 열화진행의 예측이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 대기 중의 비래염분을 정량화하는데 사용되는 시험장치 개발을 위해, 기존 포집기가 가지는 문제점을 보완함과 동시에 새로운 포집방식으로 기준이 되는 포집기를 개발하는 것을 목표로 하였다. 또한 개발된 포집기를 이용하여 해안지역(부산, 인천)의 비래염분을 실측하여 구조물의 입지조건(계절, 방향, 거리, 높이)에 따른 분포특성과 기상조건(바람의 발생빈도, 풍속, 강우의 유무)에 따른 유동특성을 분석하여, 해안지역 대기 중의 비래염분을 정량화하고자 한다.

대기 중의 비래염분량과 각종 건축마감재 표면에 부착되는 비래염분량의 관계를 분석하고자 한다.

앞서 정량화를 통해 도출된 값은 대기 중의 비래염분량을 나타내는 지표로서 사용되는 것으로, 실제 구조물의 표면에 부착되는 비래염분량과는 다소 차이가 있다. 이에 비래염분 환경을 인공적으로 재현한 축진 비래염분 시뮬레이터를 개발하여, 비말대 구조물의 내염설계를 위한 염해시험이 가능하도록 지향하였으며, 개발된 시뮬레이터를 이용하여 각종 건축마감재 표면에 부착되는 비래염분의 특성을 평가, 대기 중의 비래염분량과 각종 건축마감재 표면에 부착되는 비래염분량의 차이를 확인하고자 한다. 이와 같은 일련의 과정을 통해 도출된 결과는 구조물의 내염설계를 위한 경계조건인 표면염화물량 산정에 유용이 활용될 것으로 생각된다.

마감재별로 부착 비래염분량에 따른 부식 저항성을 평가하고자 한다.

비래염분에 의한 구조물의 부식 염해를 방지하기 위해서는 최적의 방식(차염)성능을 가지는 마감재를 적용하여 비래염분의 침투를 사전에 차단하는 것이다. 하지만 마감방식이 다양한 관계로 염해환경의 강약에 따른 적절한 마감재를 선정하는데 어려움이 있어, 적재적소 사용에 혼란을 초래하고 있다. 이에 촉진 부식시험과 폭로 부식시험의 병행을 통해 마감재별로 부착 비래염분량에 따른 방식(차염)성능을 검토하고자 한다.

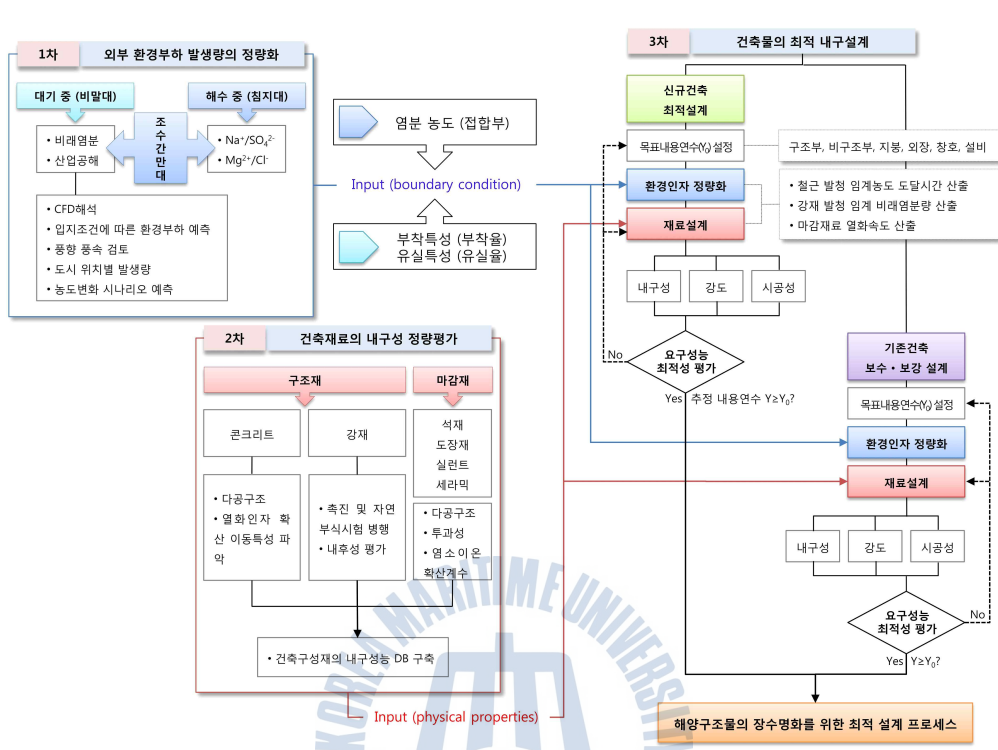
앞서 기술한 일련의 연구목적을 정리하면 다음과 같다. 지역별로 구조물의 입지조건과 주변 기후조건에 따라 대기 중에 분포하고 있는 비래염분량은 다소 상이하지만 본 연구에서 개발된 다방향 포집기를 이용해 정량화할 수 있으며, 이 정량화를 통해 도출된 값은 각종 마감재별로 부착되는 비래염분량(표면염화물량)으로 환산할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 부착 비래염분량에 따라 각종 마감재의 부식 저항성을 검토한 결과는 향후, 대기 중의 비래염분량이 확인된 지역에 건설되는 구조물에 최적의 방식(차염)성능을 발휘하는 마감재를 선정하는데 큰 도움을 줄 것으로 사료된다. [그림 1-1]은 연구의 목적을 도식으로 정리한 것이다.

1.3 논문의 구성

[그림 1-2]는 연구의 진행과정을 각 장별로 나누어 간략히 설명한 것이다. 본 논문에서의 각 장별 구성과 내용은 아래와 같다.

1장에서는 본 연구의 배경으로, 비래염분으로 인해 건축구조물에서 발생하는 문제점을 시사하였고 이를 해결하기 위한 연구의 목적에 대해 기술하였다.

2장에서는 촉진 비래염분 시뮬레이터의 필요성을 언급하였으며, 시뮬레이터에 대한 소개 및 개발과정에서 실시한 성능검증 시험을 나타내었다. 아울러 비래염분 포집기의 포집 정확도 향상을 위해, 이종석 (2006)의 연구결과(포집기별 포집성능 검토)를 참조한 후, [JIS]-Type 포집기²⁾가 가지는 문제점을 지적, 이를 개선하였다. 개선된 포집기를 바탕으로 8방향의



[그림 1-1] 연구의 목적

포집이 가능한 다방향 포집기를 개발하여 대기 중의 비래염분을 정량화하는데 사용하였다.

3장에서는 실제 해안지역(부산, 인천) 5개 지점의 비래염분을 측정한 결과를 나타내었다. 측정된 결과를 토대로 계절별, 방향별, 거리별, 높이별로 지리조건에 따른 비래염분의 분포특성을 분석, 정량화하였다. 또한 다방향 포집기와 풍향풍속계(風向風速計)를 동일한 위치에 설치, 측정된 비래염분량과 관측된 기상데이터와의 상관성을 검토하였다. 또한 범용성이 높은 기상월보(氣象月報)의 데이터와 측정된 비래염분량과의 비교를 통해 향후, 기상월보의 데이터를 바탕으로 대기 중 비래염분의 정량화 가능성을 검토하였다.

2) 일본공업규격 JIS Z 2382에 준해 건식거즈를 이용한 비래염분 포집기



[그림 1-2] 연구 순서

4장에서는 건축마감재별로 부착되는 비래염분량을 변화시키는 영향인자들을 대상으로 축진 부착시험을 실시, 모르타르, 강재, 타일의 마감재별로 부착특성을 평가하였다. 이를 통해 대기 중 비래염분량을 기준으로 각종 마감재에 부착되는 비래염분량으로 변환이 되도록 유도하였다.

5장에서는 강재마감재별로 부착 비래염분량에 따른 부식 저항성을 평가하였다. 축진 부식시험을 통해 마감재 부식여부 및 부식개시 후의 방식(차염)성능 상실속도를 분석하였다. 또한 폭로 부식시험을 병행하여 실제 염해환경에서의 강재마감재 내후성을 분석하였다.

6장에서는 본 연구의 결론으로, 각 장의 연구결과를 종합적으로 검토하였다.

1.4 국내외 연구동향

본 연구의 목적과 연관성이 있는 국내외 선행 연구사례들을 조사하였다. 크게 대기 중 비래염분의 정량화, 대기 중 비래염분량과 구조물에 부착되는 비래염분량의 관계, 부식방지를 위한 마감재의 내식성 평가로 나누어 기술하였다.

(1) 대기 중 비래염분의 정량화

국외의 비래염분 실측 조사는 주로 일본에서 실시되었다. 일본토목연구소에서는 1998년 무도장 내후성 교량의 적용가능 지역을 보다 명확히 하고 콘크리트 교량의 염해대책을 필요로 하는 지역을 명확히 구분할 목적으로 비래염분을 실측 조사하였다. 또한 1984년 12월 10일부터 1987년 12월 9일까지 3년에 걸쳐 각 관계 기관의 협력을 통해 비래염분 전국조사를 실시하였으며, 전국 266개 지점의 대기 중 비래염분량을 측정하였다. 3년간의 조사 결과를 바탕으로, 해안으로부터 이격거리에 따른 비래염분량 근사식 제안을 통해 지역특성을 정량적으로 파악하고자 하였다. 또한 지역특성이 해풍의 풍향, 풍속 등 해풍의 특성에 의존하고 있는 것을 확인

하였다. Swatekititham, et al (2004)는 비래염분이 해안으로부터 약 200m 부근에 많이 분포하고 있으며 이격거리의 증가에 따라 그 양이 적어지는 경향이 있다고 보고하였다. 발생시점의 대기 중 비래염분량은 직접적으로 해안의 형상(모래사장, 암초, 테트라포드의 유무)에 의해서도 상당히 달라지는 것으로 보고되고 있다. 이종석 (2006)은 일반적으로 수심이 얇은 해수욕장보다도 암초 및 테트라포드가 배치되어 있는 해안이 파도가 높고 물보라가 발생되기 쉽기 때문에 비래염분의 발생량은 많다고 하였으며, 本橋健司 外 (1986)는 해안에 암초 또는 테트라포드 등이 있는 경우, 지형이 평탄한 지점에서는 더욱 먼 거리까지 많은 양의 비래염분이 날아오지만 해안으로부터 이격거리가 수백m 이상이 되면 해풍의 방향과 차폐물의 유무에 의한 영향은 적어진다고 보고하였다. 그러나 대상 구조물과 바다 사이에 다른 구조물과 수목(樹木) 등의 장애물이 있는 경우 또는 대상 구조물에서 바다와 반대쪽 면 즉, 바다를 기준으로 대상 구조물의 후면에서는 비래염분의 부착량이 적어지는 경향이 있다고 보고하였다. 富板崇 外 (1988)은 주변에 차폐물이 없는 경우, 비래염분이 날아오는 방향은 지형과 상응하지만 장애물이 있는 경우, 비래염분의 유입이 차단되고 강우에 의한 유실효과가 더 크게 나타난다고 보고하였다. 本橋健司 外 (1986)은 시미즈시에서 1983년부터 1년간 건식거즈와 여러 가지 강재를 포집판으로 이용하여 비래염분을 측정한 결과, 해안으로부터 이격거리가 짧을수록 측정되는 비래염분량이 많은 것으로 보고하였다. 月永洋一 外 (1991)은 해안 지역에서 측정한 비래염분을 근거로 일본의 비래염분 환경을 분석하여, 일본의 서쪽은 계절풍의 영향에 의해 가을철에 비래염분이 많고 큐슈 북쪽은 태풍의 영향에 의해 여름철에 비래염분량이 많은 것으로 보고하였다. Toishi, et al (1995)는 비래염분량은 해안으로부터 300m까지 급격한 감소를 보이며 암초가 많은 해안일 경우, 대기 중에 분포하고 있는 비래염분량이 보다 많은 것으로 보고하였다. 또한 강한 계절풍이 있는 12월에서 3월까지 많은 비래염분이 발생하는 것으로 보고하였으며, 해풍의 풍속과 비래염분량의 상관성을 분석하였다. 風間洋 外 (2004)는 [PWRI]-Type

포집기³⁾를 이용, 높이별로 비래염분을 측정한 결과를 仲座宋三 外 (1999)의 측정결과와 비교하여 이류, 확산 예측식을 산정하였으며, 주택지에서는 지상에 비해 2층 옥상부의 비래염분량이 많고 방위별로 비래염분량의 차이가 있음을 보고하였다. 바다로부터 유입되는 비래염분은 강한 계절풍 등의 영향을 받는 지역에서는 염분의 입자가 다소 크더라도 일반지역의 경우보다 더 멀리 운반되므로 대기 중의 비래염분량은 대체로 많은 편이다. 그러나 해안으로부터 거리가 멀어질수록 대기 중의 염분량이 감소하는 경향은 일반지역인 경우와 비슷하다. 따라서 계절풍이 부는 지역에서도 해안으로부터 거리와 대기 중의 비래염분량과의 관계는 일반지역과 유사한 경향을 나타낸다. 이종석 (2006)은 대부분의 지역에서는 바다로부터 날아 들어오는 비래염분에 가장 크게 영향을 주는 것은 낮과 밤에 부는 해륙풍이고, 이 힘의 크기는 지역풍에 의해 크게 영향을 받지 않는다고 보고하였다. 日本土木學會 (1995)에서는 염해 환경조건에 대한 보고에서 16개 방향에서 날아온 비래염분량이 많은 방향은 최대풍속시의 풍향과 유사하다는 결론을 얻었다. 富板崇 外 (1988)은 [JIS]-Type 포집기로 비래염분을 측정하여 풍향, 풍속 및 강우량 데이터와의 관계를 해석, 비래염분량은 방위별 풍속과 상관관계가 있으며 또한 강우에 의해 영향을 받는다고 보고하였다. 仲座榮三 外 (1998)은 장기간에 걸쳐 비래염분을 측정한 후, 주변 기상데이터(강우량)와 비교를 한 결과로, 비래염분이 강우에 의해 낙하되어 그 양이 감소한다고 보고하였다.

국내의 경우, 대한주택공사에서 1994년 3월부터 11월까지 9개월간 속초, 강릉 등 9개 지역, 15개 지점을 대상으로 일본의 [JIS]-Type 포집기를 사용하여 대기 중의 비래염분량을 측정한 사례가 있다. 측정결과 태풍의 영향을 받는 7월에서 9월이 가장 많은 비래염분량을 나타내었으며, 동해에 접한 해안이 더 많은 비래염분의 분포를 나타내었다. 또한 대기 중의 비래염분은 풍속과 밀접한 관계가 있는 것으로 추정하였으며, 해안에서 가까울수록 비래염분량이 많은 것으로 보고하였다. 하지만 상기 조사는 9개

3) 일본토목연구소(Public Works Research Institute)에서 자체 개발한 포집기

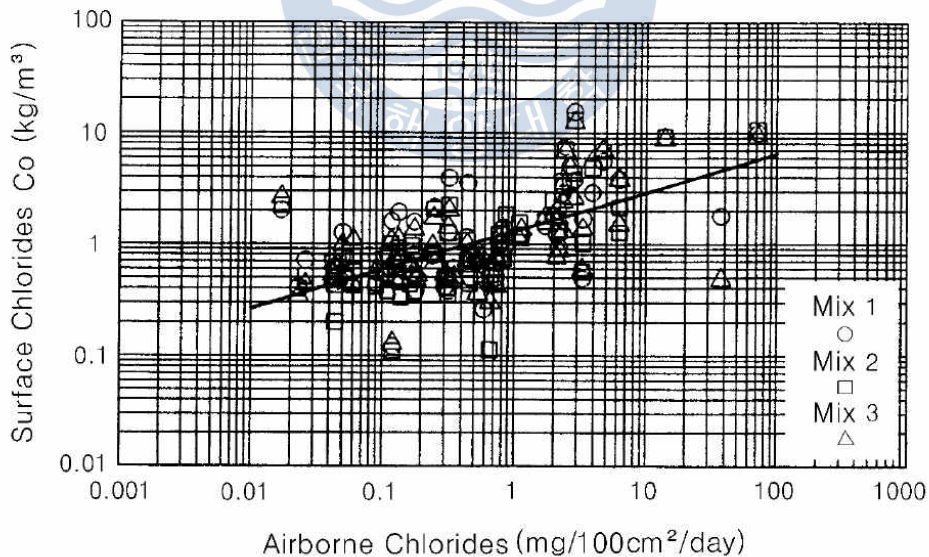
월간이라는 짧은 기간의 측정으로 데이터의 신뢰도가 떨어지며, 연구 목적에 따라 특정지역에서만 측정되어 일반적인 지역에서의 비래염분량을 추정하기에는 어려울 것으로 사료된다. 한국도로공사에서는 2000년 11월부터 동, 서, 남해안지역의 고속도로에 있는 교량 5개소에 [JIS]-Type과 [PWRI]-Type 포집기를 설치하여 비래염분량을 측정하였으며, 2002년 7월부터 서해대교 및 옥계항 등 8개소를 추가로 측정하였다. 측정 목적은 해안으로부터 거리별, 해수면으로부터의 높이별로 분포하고 있는 비래염분의 양을 파악하기 위함이었다. 하지만 측정 목적이 고속도로의 교량 등 국부적인 환경으로 초점이 맞춰져 있어 일반적인 비래염분 경향이나 다양한 환경을 반영하기에는 미흡한 점이 있다.

(2) 대기 중 비래염분량과 구조물에 부착되는 비래염분량의 관계

국외의 大郎信明 外 (1987)는 대기 중의 비래염분량에 비해 실제 구조물 표면에 부착되는 양은 다르게 나타나므로 이들의 상관관계는 비래염분에 의한 피해를 예측하는데 중요한 지표가 된다고 하였으며, 대기 중의 비래염분량과 콘크리트 표면에 부착된 비래염분량의 관계를 [표 1-1]과 같이 나타내었다. 日本土木研究所 (1993)에서는 3년간의 폭로시험을 통해 대기 중의 비래염분량과 콘크리트 표면에 부착된 비래염분량(표면염화물량 C_0)은 [그림 1-3]과 같은 관계가 있음을 주장하였으며, 회귀분석을 통해 식(1-1)과 같은 관계식을 도출하였다. 靑山實伸 外 (2003)은 해안지역에 위치한 콘크리트 구조물에 대해서 해안으로부터의 이격거리와 표고(標高)에 의한 표면염화물량을 검토하였으며, 표면염화물량 C_0 는 해상(海上)과 해안선(海岸線)의 위치에서는 표고 15m에서 10kg/m^3 이상이었고, 해상의 위치에서 표고 20m를 초과하는 경우 7kg/m^3 미만으로, 해안선으로부터 이격거리가 20m이상 떨어진 경우에는 약 5kg/m^3 미만으로 크게 낮아진다고 보고하였다.

[표 1-1] 대기 중 비래염분과 부착 비래염분의 관계(大郎信明 外, 1987)

해안선에서 이격거리	대기 중의 염분량	콘크리트 표층부의 염분확산량
0.2km 까지	0.3~0.8mg/dm ² /day (해수가 직접 부착되는 경우도 있음)	0.03%를 훨씬 초과
1km 까지	평균 0.2mg/dm ² /day	500m에서는 0.03% 초과 ○ 800m에서는 0.03% 초과 ×
10km 까지	태풍 발생 시 및 강한 계절 풍 등에 의해 특수한 상황 에서 어느 정도 염분이 존 재하는 경우가 있음	—
10km 이상	대기 중에는 철근콘크리트 의 내구성에 영향을 주는 염분은 존재하지 않음	—



[그림 1-3] 비래염분량과 표면염화물량의 관계(日本土木研究所, 1993)

$$C_0 = mx^n \quad (1-1)$$

C_0 : 표면염화물량 (NaCl, kg/m³)

x : 비래염분량의 평균값 (NaCl, mg/dm²/day)

m, n : 계수

山田文則 外 (2004)는 각주 및 원주형의 구조물을 해안지역에 설치하여 각 표면 12부분에 부착된 비래염분량을 측정하였으며, 이를 주풍향과 비교하였다. 그 결과 구조물의 형상 즉, 구조물로 유입되는 주풍향의 입사각도에 따라 부착되는 비래염분량이 상이한 것을 확인하였다. 또한 小窪幸恵 外 (2009)는 비래염분과 함께 유입되는 바람의 입사각도에 따라 구조물에 부착되는 비래염분량을 삼각함수의 법칙에 의해 변환하여, 비래염분 전달과정에 대한 시뮬레이션 해석에 사용하였다. 이와 같이, 바람의 입사각도에 따라 부착되는 비래염분량의 차이를 보고한 선행 연구사례들은 있으나 이를 정량적으로 산정하기 위한 연구는 현재 전무한 실정이다.

한편, 실제 구조물의 표면염화물량은 강우 등의 영향을 받는 경우, 받지 않는 경우에 비해 상대적으로 낮은 값이 나타나는 것으로 보고되고 있다 (靑木慶彦 外, 2010). 이것은 강우의 세정작용에 의해 구조물 표면에 부착되어 있던 비래염분이 일부 제거됨을 시사하고 있다. 이와 관련하여 椿龍哉 外 (2011)는 콘크리트 표면에 부착된 염분이 강우의 세정작용에 의해 유실되는 정도를 강우재현 시뮬레이션을 통해 파악하였다.

국내에서는 이종석 (2006)이 콘크리트 시험체의 표면을 연마, 흠손에 의한 마감, 와이어 브러시로 거칠게 마감한 것으로 나누어 1년간 해안지역에서 폭로시험을 실시, 표면 거칠기에 따라 부착되는 비래염분량(표면염화물량)을 조사하였다. 그 결과 콘크리트에 부착된 비래염분량은 표면 거칠기가 보통인 경우를 기준으로 할 때, 매끄러운 표면에서는 55~85%까지

의 감소하였으며, 표면이 거친 경우는 130~170%까지 증가되는 것으로 확인하였다. 또한 김현정 (2010)은 인공적인 비래염분 환경을 재현한 실내 실험을 통해 마감재별로 비래염분의 부착특성을 검토하였으며, 분석 결과 모르타르 마감재가 가장 많은 부착량을, 타일이 가장 적은 부착량을 가지는 것으로 보고하였다. 하지만 실험재료가 모르타르, 석재, 타일로 한정되어 있어, 다양한 종류의 마감재에 부착되는 비래염분의 일반적인 특징을 대표하기에는 다소 부족한 면이 있다.

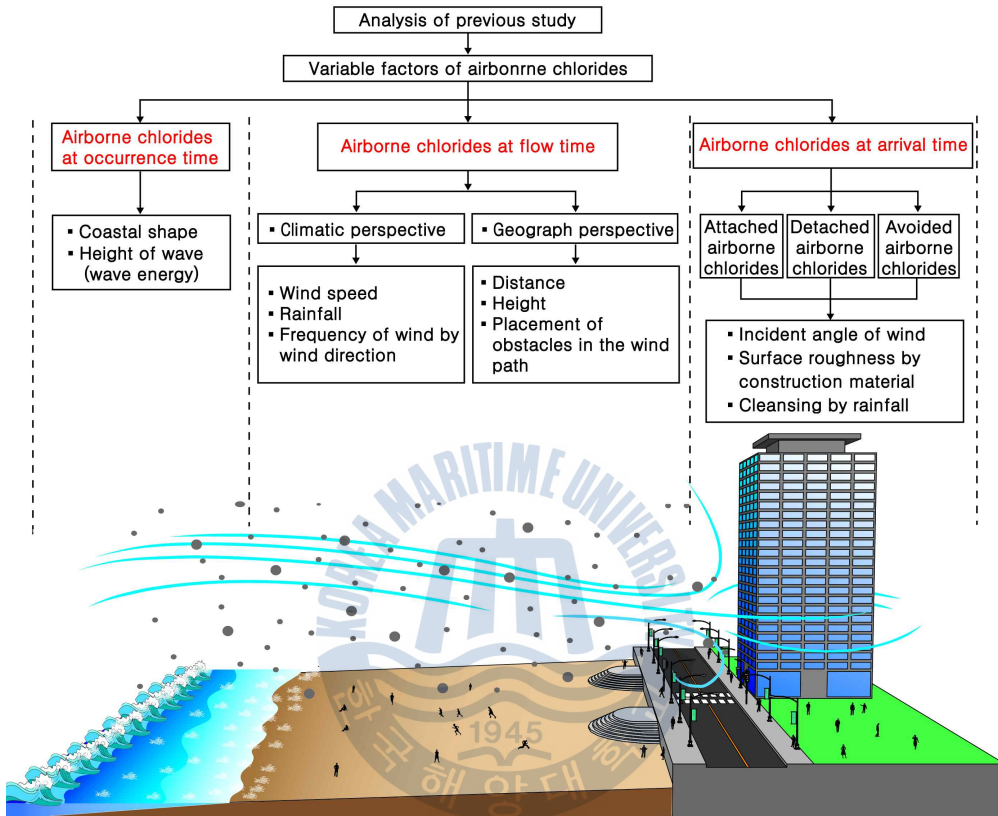
(3) 마감재의 부식 저항성 평가

국외의 경우, 표면 마감재의 염화물 투과를 검토하기 위한 시험방법으로는 일본도로협회의 도로교 염해대책 지침(안)이 있지만 이는 철근콘크리트 구조물의 경우에만 해당되는 것으로 강 구조물에 적용하기에는 어려움이 있다.

국내의 경우, 한국도로공사도로연구소 (2001)에서 해안지역에 건설되는 철근콘크리트 구조물의 안전성과 내구수명 확보를 위해, 염화물 침투를 억제할 수 있는 콘크리트용 표면 마감재의 성능평가를 실시하여 방식성능 확보를 위한 최적 마감재 선정과 시공방법을 제시하였다. 하지만 강 구조물의 방식을 위한 표면 마감재에 있어, 염화물 차단성능을 측정하는 규격은 존재하지 않는다.

앞서 기술한 선행 연구사례들을 정리한 결과, 내륙으로 전달 및 구조물에 부착되는 비래염분량은 주변 지형과 장해물 등에 의해 영향을 받을 수 있으며, 마감재의 표면조건에 따라서도 변하므로 정량적으로 예측하기가 상당히 어려운 실정이다. 따라서 본 저자는 비래염분이 구조물로 전달되기까지의 과정에 대해 과거 비래염분 관련 연구사례들을 조사하여 시점별로 분류하였다. [그림 1-4]에 비래염분의 전달과정을 분류한 결과를 나타내었다. 아울러 각 시점별 단계에서 비래염분량에 변동을 주는 요인들을 제시하였다. 또한 [표 1-2]는 앞서 조사한 국내외의 선행 연구사례들을 검

토하여 연구수준을 비교, 분석한 것이다.



[그림 1-4] 비래염분 전달과정의 분류

[표 1-2] 국내외 연구수준의 비교

1. 비래염분 현황 조사	
국내	<ul style="list-style-type: none"> 주로 토목교량 분야에 관련한 비래염분 연구가 수행 됨 건축분야에서 비래염분 관련 연구가 전무함
국외	<ul style="list-style-type: none"> 해안에서의 이격거리에 따른 지역별 대기 중의 비래염분 MAP 완성
2. 대기 중 비래염분과 구조물 부착 비래염분의 관계	
국내	<ul style="list-style-type: none"> 철근콘크리트 구조물을 대상으로 실시 콘크리트 표면 거칠기에 따른 비래염분 부착량 측정 건축재가 콘크리트 위주로 한정되어 있음 마감재별 비래염분의 부착특성을 평가하는 연구가 전무함
국외	<ul style="list-style-type: none"> 콘크리트 폭로시험을 통해 표면염화물량 산정 콘크리트 표면에 부착된 비래염분이 강우에 의해 유실되는 정도 파악 건축재가 콘크리트 위주로 한정되어 있음 마감재별 비래염분의 부착특성을 평가하는 연구가 전무함
3. 부식방지 마감재	
국내	<ul style="list-style-type: none"> 강 구조물에 미치는 열화인자 중, 비래염분에 의한 부식연구 전무 비래염분이 아닌 염수분무를 통한 강재부식 실험 진행, 이를 통해 강재의 내후성을 대체하여 평가 염해에 관련한 마감재의 성능평가에 관련 연구 초기단계
국외	<ul style="list-style-type: none"> 무도장 강재뿐만 아니라 내후성 강재 및 스테인리스 등 강재부식 메커니즘 확인 중 강재의 마감별로 방식(차염)성능 검토에 대해서는 전무 도막의 염화물이온 확산계수 산출시험 방법 및 모델 개발 복합재료(마감재+ 콘크리트)의 잔존수명 예측에 대한 연구 초기단계 보수부재의 내염해성 평가 및 예측모델 개발 중 최적 유지관리 시스템의 개발과 적용에 관한 연구가 진행 중

제 2 장 비래염분 정량화를 위한 시험장치 개발

2.1 개론

2.1.1 축진 비래염분 시뮬레이터

극한 염해환경에 노출되는 구조물의 내구성 확보 및 유지관리를 위해서는 외부 환경부하의 정량적인 분석과 더불어 부착된 비래염분과 강재발청의 상관성 규명에 관한 연구가 다루어져야 한다. 이러한 목적으로 비래염분에 의한 강재의 내후성을 평가하기 위해, 축진 및 폭로 부식시험이 다수 실시되고 있으나 폭로 부식시험은 비래염분뿐만 아니라 자외선, 산성비, 산업공해 등 부식에 관여하는 인자의 복합화와 불규칙적인 기상현상으로 인해 비래염분과 강재부식 사이의 정량적인 상관성을 도출하는데 어려움이 있는 실정이다.

한편, 건설 분야의 축진 부식시험은 주로 새로운 도장이나 방청법의 내구성 검증이나 부식성능의 상대적인 평가에 사용되어 왔다(神谷誠 外, 1994; 藤原博 外, 1997; 高橋定明 外, 2003). 강재의 방청법에 대한 장기내구성 평가에는 폭로 부식시험이 일반적으로 사용되고 있으나 노화데이터를 얻기까지는 수년에서 수십 년이라는 장시간의 실험기간을 필요로 한다. 藤原博 外 (1997)의 연구에서는 강재 방청법의 단기 내구성 평가를 위해 무도장 강재의 축진 부식시험(표 2-1 참조)의 활용에 대해 검토하였고 김인태 (2007)는 축진 부식시험과 대기 노출환경과의 상관관계를 밝히기 위해, 부식에 관여하는 지역별 축진배율을 설정하여 이를 실제 대기 노출환경으로의 적용에 대해 검토하였다. 즉, 폭로 및 축진 부식시험으로

[표 2-1] 각종 부식환경 촉진시험 조건(藤原博 外, 1997)

Test type	Test condition of one cycle			
S6 cycle (JIS K 5621)	Salt-spray 5% NaCl 30℃ 0.5hr	Wet → 95% R.H. 50℃ 2hr	Dry → 20% R.H. 30℃ 2hr	Dry → 20% R.H. 30℃ 2hr
SS cycle (JIS Z 2371)	Salt-spray 5% NaCl 35℃	→ Continue	→	→
JASO cycle (JASO M609-91)	Salt-spray 5% NaCl 35℃ 2hr	Dry → 50% R.H. 70℃ 4hr	Wet → 95% R.H. 50℃ 2hr	→
ASTM cycle (ASTM D2933-74)	Salt-spray 5% NaCl 35℃ 4hr	Wet → 100% R.H. 37.8℃ 18hr	Freeze → -23.3±2℃ 2hr	→
DS cycle (PWRI in 1980)	Salt-spray 5% NaCl 35℃ 0.5hr	Dry → 50% R.H. 50℃ 2hr	Wet → 90% R.H. 50℃ 15hr	Dry → 50% R.H. 50℃ 5hr
NS1 cycle	Salt-spray 5% NaCl 35℃ 4hr	Dry → 50% R.H. 60℃ 2hr	Wet → 95% R.H. 50℃ 2hr	→
NS2 cycle	Seawater- spray 35℃ 4hr	Dry → 50% R.H. 60℃ 2hr	Wet → 95% R.H. 50℃ 2hr	→

부터 구한 각각의 무도장 강재의 중량감소량을 이용하여 촉진배율(촉진 부식시험 조건이 각 폭로 부식시험 위치의 부식환경을 어느 정도로 촉진 하고 있는가를 나타낸 지수)을 산출하고, 폭로 부식시험 위치의 부식환경 지역구분, 해안선으로부터 거리, 비래염분량과의 관계를 검토하였다. 하지만 실제 환경에서의 부식 데이터와 촉진 부식시험을 통해 도출된 데이터를 재정렬 시켜야 하는 어려움이 있다. 그 과정에서 촉진배율을 정식화해야하지만, 부식환경의 지역구분(해안지역, 전원지역, 산간지역) 및 거리에

따른 촉진배율의 논의에 상당히 어려운 문제가 있다. 또한 부식정도를 평가하는 비래염분량과 촉진배율의 관계를 도출하였지만 그 과정 또한 상당히 복잡하다.

지금까지 비래염분이 강재부식에 직접적으로 관여하고 있음에 대한 인식은 공통적으로 하고 있으나 통상 촉진 부식시험의 일환인 염수분무시험으로 대체하여 실시하고 있어 비래염분에 의한 염해 내구성을 도출하고자 할 경우, 정보의 유효성이 낮다고 할 수 있다. 따라서 상기의 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 인공적으로 비래염분 발생시켜 각종 기상조건(풍향 및 풍속 등)의 제어를 통해 강재 및 건축마감재의 열화시험을 할 수 있도록 된 새로운 구조의 염해 촉진 시뮬레이터를 제공하고자 한다. 기존의 유사한 시험장치로는 靑木慶彦 (2010)와 이종석 (2006)의 시험장치가 있다. 靑木慶彦 (2010)의 풍동형시험장치(부록 A 참조)는 비래염분을 발생시키는 기포장치의 원리가 본 연구에서 개발한 시뮬레이터와 유사하나 본체의 구조가 비래염분 순환형 구조인 관계로 시간경과에 따라 장치내부의 비래염분량이 지속적으로 증가하는 원리로 되어 있어, 강재의 부식 임계 비래염분량을 도출하는 실험을 수행하기에는 어려운 구조로 되어 있다. 이종석 (2006)의 비래염분 포집성능 시험장치(부록 A 참조)는 해안에서 불어오는 해풍의 역할을 하는 송풍장치, 송풍장치에서 발생한 바람을 모아서 염분에어줄 발생장치까지 이동시켜 주는 1차 송풍로, 염분에어줄 발생장치, 염분에어줄을 포집기까지 이동시켜 주는 2차 송풍로로 구성되어 있다. 송풍장치는 전 단면적에 걸쳐 풍속 0~10m/sec까지 발생시키는 다익(Multi-blade) 형식의 회전날개를 장착하였다. 염분에어줄 발생장치는 분사 노즐의 분사방향을 벽면을 향하게 설치하여 노즐에서 분사되는 염분에어줄 중 수분이 많은 무거운 입자를 제거하였으며, 상대적으로 가볍고 작은 입자를 형성함으로서 자연상태에 상당하는 비래염분을 모사하였다(이종석, 2006). 하지만 비래염분 포집기 개발을 위한 성능검증용으로만 사용되었으며, 비래염분 환경을 모사한 풍동시험용으로는 크기가 작은 단점이 있다.

2.1.2 비래염분 포집기

일반적으로 대기 중에 분포하고 있는 비래염분을 측정하는 방법으로 비래염분 포집기를 사용해 왔다. 대표적인 포집기로는 일본공업규격(JIS Z 2382)에 준한 [JIS]-Type, 일본토목연구소의 [PWRI]-Type, ISO 9225에 준한 [Wet Candle]-Type 등을 들 수 있다. 일본토목연구소에서는 비래염분 측정에 [JIS]-Type을 사용하지 않고 [PWRI]-Type을 자체적으로 개발하여 사용하였으며, 그 이유로는 건식거즈를 이용한 [JIS]-Type의 포집방법은 비래염분량이 크게 증가하는 3월, 4월의 경우, 거즈 자체의 포집능력의 한계로 인해 정확한 비래염분 측정에 어려움이 있었기 때문이다. 일본토목연구소의 실험결과를 인용하면, [PWRI]-Type을 사용한 경우, [JIS]-Type에 비해 최고 5배까지 많은 양의 비래염분을 포집할 수 있었다고 하였지만 이종석 (2006)은 자체적으로 개발한 비래염분 포집성능 시험장치(**부록 A 참조**)를 통해 [PWRI]-Type의 포집성능에 관련한 문제점을 확인하였다. 아울러 건식거즈를 적용한 새로운 포집기 [K3]-Type 개발을 통해 문제점을 보완하려는 노력을 기울였다. [K3]-Type은 유입구와 배출구가 형성된 사각형 케이스 내부에 비래염분을 포집하기 위한 거즈가 설치되어 있으며, 케이스의 유입구로 유입된 바람이 거즈를 통과하여 배출구로 배출되도록 함으로서, 바람에 실려 온 비래염분이 거즈에 포집되도록 한 것이다. 그러나 비래염분을 운반하는 바람은 1방향에서 일정하게 불어오지 않고 시시각각 여러 방향에서 불규칙적으로 불며, 특히 해안지역에 위치한 구조물의 경우, 해안을 바라보는 방향뿐만 아니라 측면과 후면에서도 해풍의 영향을 받는다. 즉, 전달되는 비래염분에 방향특성을 부여하는 것은 구조물의 입지조건에 따라 내염설계를 구조물의 각 방면별로 분리하여 적용할 수 있기 때문이다. 하지만 [K3]-Type은 1방향만을 향하도록 고정 설계되어 있어, 측면과 후면에서 날아오는 비래염분을 포집하기에는 어려움이 있다. 또한 바람이 통과하는 구조로 되어 있어 바람이 배출구를 향해 역방향으로 불어올 경우, 거즈에 포집된 비래염분이 탈락될 우려가 있었

고 이점에 대해서는 저자의 기초실험을 통해 입증하였다. 또한 습식거즈를 사용한 [Wet Candle]-Type 포집기는 대기 중의 전반적인 비래염분량 측정에는 용이하나 방향성을 가진 비래염분 데이터 구축에 어려운 단점이 있다.

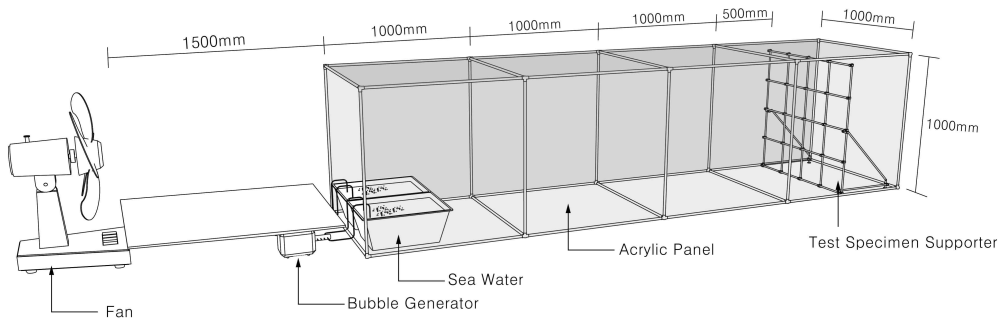
따라서 본 저자는 불규칙적인 바람의 유동에 따라 전달되는 비래염분을 포집하기 위해서는 기존 포집기 자체가 가지는 포집성능의 검토뿐만 아니라 포집방향에 대한 고려도 동시에 이루어져야 할 필요가 있다고 생각하였다. 따라서 본 연구에서는 포집기의 포집 정확도 향상을 위해 이종석(2006)의 연구결과(포집기별 포집성능 검토)를 참조한 후, [JIS]-Type을 기본으로 하여 포집기를 개선 및 개발하였다.

2.2 축진 비래염분 시뮬레이터

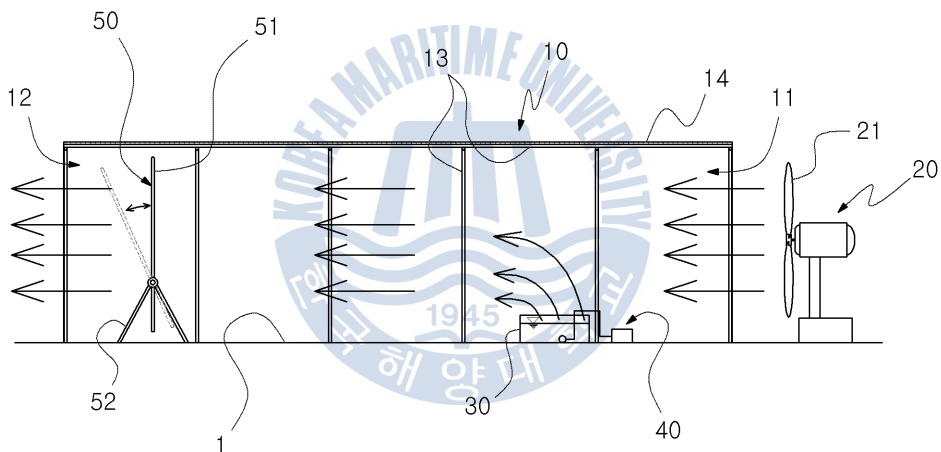
2.2.1 시뮬레이터의 구성

[그림 2-1]은 축진 비래염분 시뮬레이터의 모식도를 나타낸 것이다. 비래염분 시뮬레이터는 염해 축진시험을 위한 것으로서, 시뮬레이터의 세부적인 구성에 관한 내용은 아래의 상세도와 함께 설명하였다.

[그림 2-2]에 나타낸 급기팬(20)을 이용하여 본체(10)의 내부로 외부공기를 공급하면 저수조(30)에 저장된 해수에서 비래염분이 발생되어 시편거치대(50)에 거치된 건축마감재 또는 강재시편에 부착되어 열화를 일으키는 원리이다. 급기팬(20)과 저수조(30) 및 시편거치대(50)는 상호거리 조절을 통해 효과적으로 염해 축진 시뮬레이션을 실시할 수 있다. 또한 급기팬(20)의 풍속 조절과 시편거치대(50)의 상하, 좌우 각도 변형에 따른 풍향을 변화시켜 다양한 실험조건에 맞춘 염해 축진 시뮬레이션을 실시할 수 있는 장점이 있다.

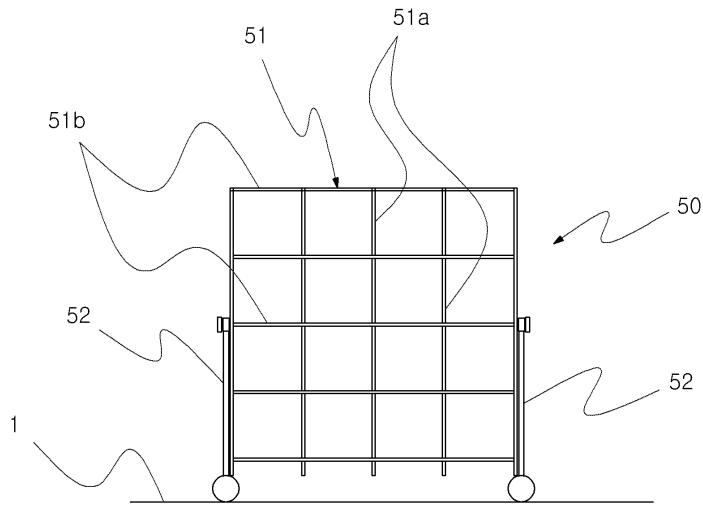


[그림 2-1] 촉진 비래염분 시뮬레이터

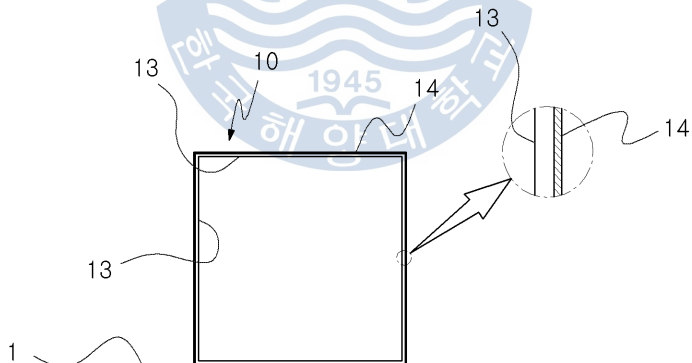


[그림 2-2] 촉진 비래염분 시뮬레이터(측면도)

[그림 2-3]은 시뮬레이터 내부에 위치하는 시편거치대를 나타낸 것이다. 시편거치대(50)는 스테인리스 재질의 수직부재(51a)와 수평부재(51b)로 구성된 망체(網體) 형태의 거치대본체(51)와 거치대본체(51)의 양쪽에 힌지가 결합되어 상하방향으로 각도를 조절할 수 있도록 지지하는 지지대(52)로 구성된다. 거치대본체(51)에 여러 개의 시편을 거치한 상태에서, 거치대본체(51)를 상하방향으로 조절하거나, 지지대(52)의 방향을 좌우로 조절하여, 급기팬(20)에 의해 발생된 바람에 대해 거치대본체(51)에 거치된 시편의



[그림 2-3] 시편거치대(정면도)



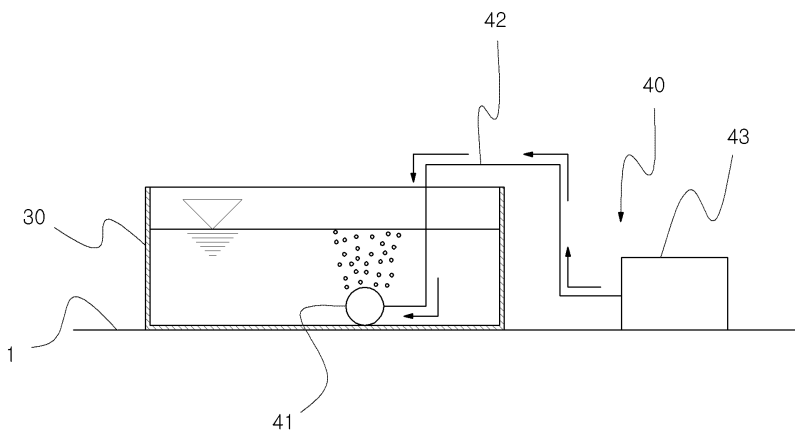
[그림 2-4] 축진 비래염분 시물레이터(단면도)

각도를 다양하게 조절할 수 있다.

[그림 2-4]는 시물레이터 본체의 단면을 나타낸 것이다. 본체(10)는 지지 프레임(13)의 둘레에 투광성의 아크릴패널(14)을 결합하여 본체(10)의 내부

에 설치된 저수조(30)나 공기기포발생수단(40)의 상태를 육안으로 확인할 수 있어 저수조(30)에 저장된 해수의 양이 줄어들거나 공기기포발생수단(40)에 이상이 발견되었을 때, 이를 확인하여 신속하게 조치할 수 있는 장점이 있다. 특히, 아크릴패널(14)은 표면이 매끄러운 특징을 가져 실험에서 발생하는 비래염분이 본체(10)에 부착되는 것을 지양하도록 설계되어 있어 실제 비래염분 발생량에 비해 과소평가가 되는 것을 방지한다.

[그림 2-5]는 비래염분이 인공적으로 발생되는 장치를 나타낸 것이다. 저수조(30)는 부식 저항성이 강한 합성수지재로 구성된다. 저수조(30)에 저장되는 용액은 해수일 수 있으며, 필요에 따라 해수와 동일한 염도의 염수를 이용할 수 있다. 공기기포발생수단(40)은 저수조(30)에 잠기도록 설치되는 에어스톤(41)과 에어스톤(41)에 튜브(42)로 연결된 공기펌프(43)로 구성된다. 에어스톤(41)은 미세한 통기공이 다수 개 형성된 구형 또는 원기둥형의 물체로서, 공기를 공급하면 공기는 통기공을 통해 작게 나뉘어져 물에 다량의 공기방울이 발생되도록 하는 것으로서, 일반적으로 어항의 물속에 공기를 공급할 때 사용되는 것이다.

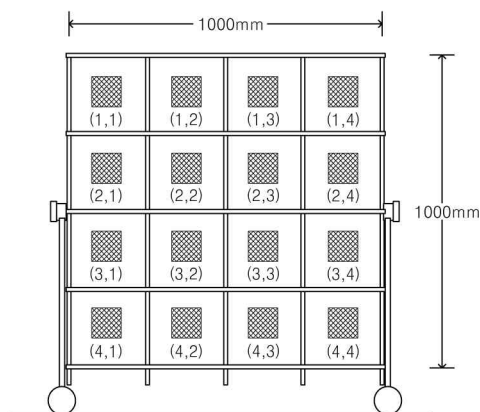


[그림 2-5] 인공 비래염분 발생장치

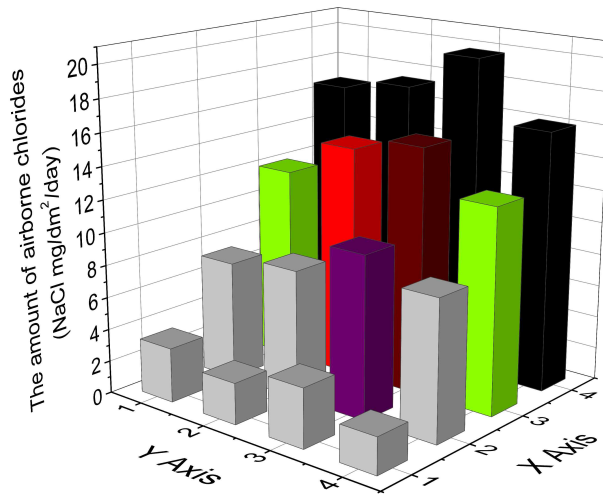
2.2.2 성능 검증

시뮬레이터의 개발과정에서 성능검증 시험을 실시하였다. 시뮬레이터 내부의 위치별 비래염분 포집 실험을 실시하였다. 실험방법으로는 [그림 2-6]과 같이 시편거치대를 설치하여 시뮬레이터의 단면을 16구역으로 나누어 각 구역에 건식거즈가 적용된 포집기를 설치하여 24시간 동안 인공 비래염분을 포집하였다. 급기팬과 비래염분 시뮬레이터의 거리는 1.75m, 시편거치대와 급기팬 사이의 거리는 3.0m로 실험을 진행하였다. 이후, 각 실험을 통해 거즈에 부착된 비래염분을 전처리를 통해 염분 농도를 측정하였다.

[그림 2-7]은 실험을 통해 측정된 16부분의 비래염분량을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 아래 부분 X축 4행 부분의 비래염분 포집량이 X축 1행보다 포집된 염분량이 높게 나타났고 X축 4행에서 X축 1행으로 높아질수록 점차 포집량이 적어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 발생된 비래염분이 시뮬레이터 내부 공기 중에 고르게 분포하고 있지 않다는 것을 나타내고 있다. 이것은 향후 시뮬레이터를 사용하는 연구를 진행함에 있어서도 시료를 설치한 위치에 따른 실험오차가 발생될 것으로 판단



[그림 2-6] 건식거즈 포집기가 설치된 시편거치대



[그림 2-7] 시뮬레이터 내부 단면 16부분의 비래염분량

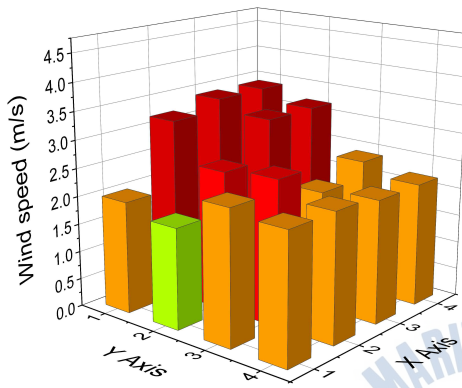
하였다.

시뮬레이터 내부의 비래염분이 고르지 않은 것은 비래염분 전달에 가장 지배적인 풍속이 일정하지 않아 16부분의 편차가 크게 발생된 것으로 추정하였다. 이와 같은 가정에 따라 16부분의 풍속을 측정하였다.

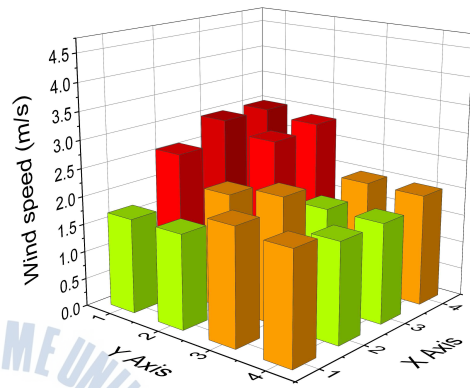
[그림 2-8]에 시뮬레이터 단면 16부분에서 측정된 풍속을 나타내었다. 풍속의 측정 위치(시편거치대)를 급기팬과의 이격거리를 5.0m로 하였을 때 가장 안정된 풍속을 유지하는 것으로 분석되었다. 따라서 향후, 시뮬레이터를 이용한 실험을 진행함에 있어서, 가장 안정되는 풍속을 유지하는 이격거리 5.0m에서 시편을 거치하는 것이 실험오차를 줄이는 한 방법이라 생각된다.

앞서 실시한 시뮬레이터 내의 풍속 보정 결과에 따라 단면 16부분에서 발생하는 비래염분량을 24시간, 72시간, 120시간에 걸쳐 이격거리 5m 위치에서 재 측정하였다. 그 결과를 [그림 2-9]에 나타내었다. 단면 16부분의 그래프가 좌우 대칭이 균등한 모습을 보여, 발생하는 비래염분이 높이에

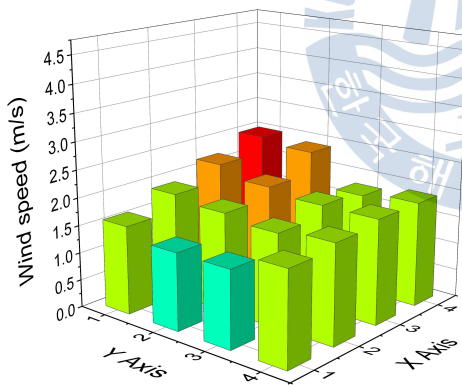
따라서 약간의 차이가 발생할 수 있으나 시뮬레이터 단면의 좌측, 우측에 대해서는 고른 분포를 보여 실험오차가 적은 안정된 실험을 진행할 수 있을 것으로 판단된다.



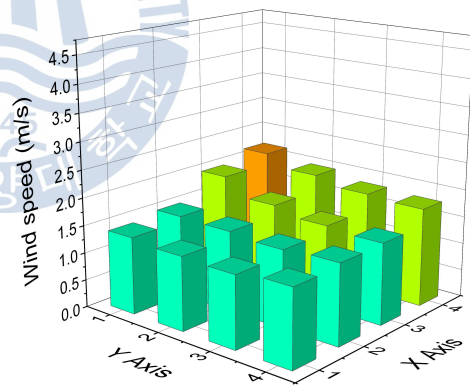
(a) 2.5m



(b) 3.0m

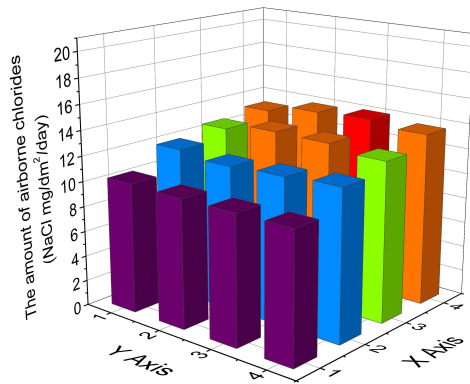


(c) 3.5m

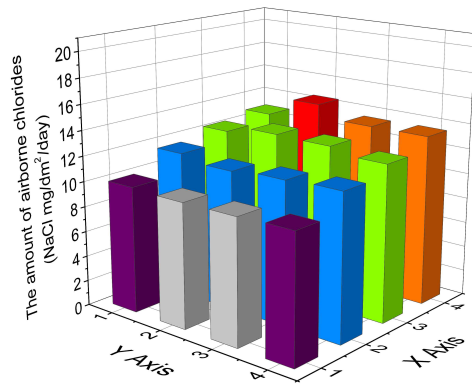


(d) 5.0m

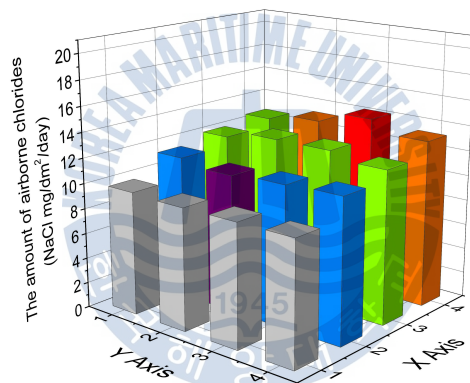
[그림 2-8] 시뮬레이터 내부 단면 16부분의 평균 풍속



(a) 24시간



(b) 72시간



(c) 120시간

[그림 2-9] 시뮬레이터 내부 단면 16부분에서 재 측정된 비래염분량

2.3 비래염분 포집기

2.3.1 포집기별 성능 및 문제점

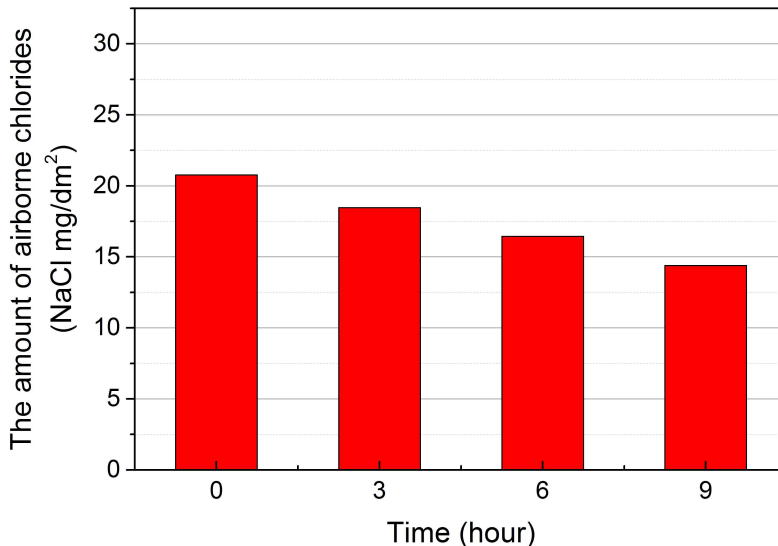
(1) [JIS]-Type 포집기

일본공업규격(JIS Z 2382)에서 제안된 건식거즈를 적용한 포집기는 장치 자체의 세목보다는 포집방법의 기본적인 안을 제시한 것이다. 내용으로는 크기 100mm×100mm의 포집판에 건식거즈를 부착하여 사용하는 것이다. 하지만 [JIS]-Type 포집기는 개방된 공간에서 비래염분을 포집하는 형태로 인해 방향성이 없는 무분별한 비래염분을 포집하는 문제점을 가지고 있다. 또한 비나 눈 등의 자연현상으로 건식거즈를 보호하기 위한 차폐판이나 박스에 관한 규정은 없다(이종석, 2006). 아울러 개방된 공간에서 비래염분을 포집하는 관계로 포집용 건식거즈에 부착된 비래염분이 포집기 뒷면에서 유입되는 바람에 의해 탈락될 우려가 있다.

건식거즈에 부착되어 있던 비래염분이 포집기 뒷면에서 유입되는 바람에 의해 탈락되는 여부를 실내 실험을 통해 검증하였다. 실내 실험의 일환으로 본 연구에서 개발한 축진 비래염분 시뮬레이터를 사용하였다. 인공 풍속은 포집기 앞면 입구에서 3.4m/s가 되도록 유지시켰다. **[그림 2-10]**은 48시간동안 [Upgrade JIS]-Type⁴⁾에 인공 비래염분을 포집한 후, 동일한 풍속으로 포집기 뒷면에 바람을 가했을 때, 거즈에서 탈락되는 비래염분을 평가한 것이다. 실험 결과, 0~9시간 경과에 따라 비래염분량이 선형적으로 감소하는 결과를 통해 거즈에 부착된 비래염분이 뒷면의 바람에 의해 탈락되어 지는 것을 확인하였다. 따라서 [Upgrade JIS]-Type과 같이 뒷면에서 바람의 유입이 가능한 포집기의 경우, 대기 중 실제 비래염분량에 비해 다소 적은 양이 측정될 가능성이 높을 것으로 예상된다.

이는 비래염분을 포집하는 포집기의 용도에 반해 불필요한 영향을 다수

4) [JIS]-Type 포집판 주위로 사각형의 박스 구조물을 둘러 바람길을 유도한 포집기



[그림 2-10] 뒷면의 바람에 의한 부착된 비래염분의 탈락

받고 있는 것으로 사료된다. [그림 2-11(a)]는 [JIS]-Type 포집기의 사진을 나타낸 것이다.

(2) [PWRI]-Type 포집기

[그림 2-11(b)]은 일본토목연구소에서 제작된 [PWRI]-Type 포집기를 나타낸 것이다. [PWRI]-Type 포집기는 스테인리스 포집판, 실리콘 호스, 저장수통 및 이들 포집기 세트를 장착할 수 있는 스테인리스 박스로 구성되어 있다. 바람과 함께 유입되는 비래염분은 스테인리스 포집기와 실리콘 호스를 통하여 직접 저장수통 내에 부착하게 된다. 스테인리스 포집판에 부착된 비래염분은 측정기간의 최종일에 증류수를 살수하여 저장 수통으로 씻어 내린다. 최종적인 비래염분의 측정은 저장수통에 있는 용액의 염분농도를 측정하여 대상 측정기간의 비래염분량으로 사용한다. 또한 포집기 하단부에는 콘크리트 시험체를 설치할 수 있는 공간을 마련하여 포집기로 날아오는 염분량과 콘크리트에 침투하는 염분량을 상호 비교할 수 있도록 하였다. 하지만 [PWRI]-Type 포집기는 거칠기가 매끄러운 스테인리스를 포집판을 사용하기 때문에 비래염분의 부착이 어렵다(이종석,



(a) [JIS]-Type



(b) [PWRI]-Type



(c) [K3]-Type



(d) [Wet Candle]-Type

[그림 2-11] 포집기의 종류

2006). 또한 바람이 통과할 수 없는 내부구조를 가지기 때문에 포집기 내부에서 바람의 흐름이 정체되어 포집성능이 떨어지는 단점을 가지고 있다 (이종석, 2006).

(3) [Wet Candle]-Type 포집기

[그림 2-11(d)]는 [Wet Candle]-Type 포집기를 나타낸 것이다. ISO 9225

에서 제안하는 방법을 적용한 포집기이다. 습식거즈를 사용하여 비래염분을 포집하는 형태로, 100cm^2 의 면적을 가진 거즈를 막대기둥에 감아 놓고, 거즈의 심지를 아래의 저장수통에 있는 수용액에 담근다. 이는 거즈의 습도를 높여 포집효율을 높이하고자 한 것이다. 하지만 [Wet Candle]-Type 포집기의 경우, 각 방향에서 날아오는 비래염분에 방향특성을 부여하기에는 어려운 구조로 되어 있다.

(4) [K1], [K3]-Type 포집기

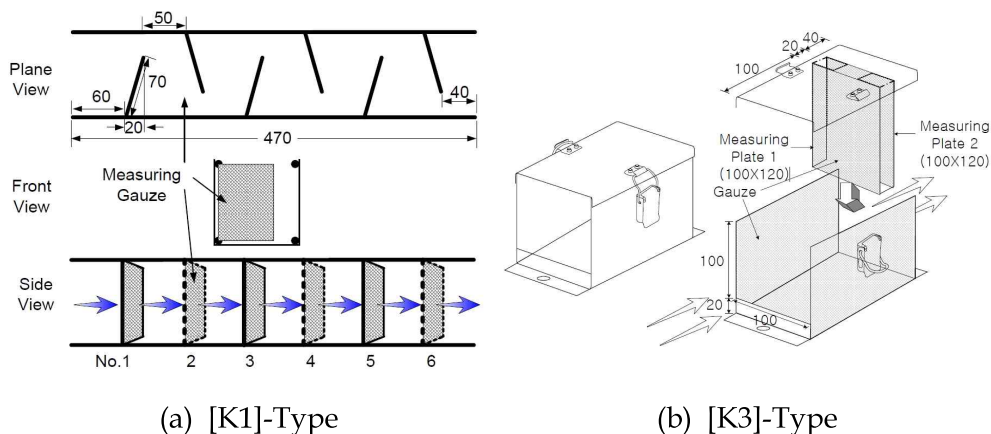
이종석 (2006)은 대기 중 비래염분의 정량적인 측정을 위하여 [K1] 및 [K3]-Type 포집기를 개발하여 상호 및 기존 포집기와 비교, 검토하여 최적의 포집기를 현장조사에 적용하고자 하였다. [그림 2-12]은 [K1] 및 [K3]-Type 포집기를 나타낸 것이며, 특징은 아래와 같다.

① [K1]-Type 포집기

[그림 2-12(a)]는 [K1]-Type 포집기의 평면도, 정면도, 측면도를 각각 나타낸 것으로, 포집판의 크기는 [JIS], [PWRJ]-Type 포집기의 포집판 크기와 동일한 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 로 설계되어 있다. 이 포집기는 포집기 입구를 통과한 해풍이 6개의 포집판을 거치도록 된 구조로서 바닥면, 측면, 천정부의 전면에 거즈를 부착하여 포집효율을 극대화하였다.

② [K3]-Type 포집기

[그림 2-12(b)]와 같이 유입구는 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 의 크기이며, 박스 내부에는 $100\text{mm} \times 120\text{mm}$ 포집판이 2개 설치되어 있다. 특히, 포집된 비래염분이 비바람에 의하여 유실되지 않도록 20mm 높이의 차단막이 설치되어 있다. [K3]-Type 포집기는 통풍로를 통하여 비래염분이 포집되지 않고 그대로 유출되는 것을 막기 위하여 [K1]-Type과 달리 별도의 통풍로를 유도하지 않고 거즈만을 통과하여 해풍이 유출되도록 고안된 장치이다. [표 2-2]는 앞서 기술한 포집기들의 특징을 요약한 것이다.

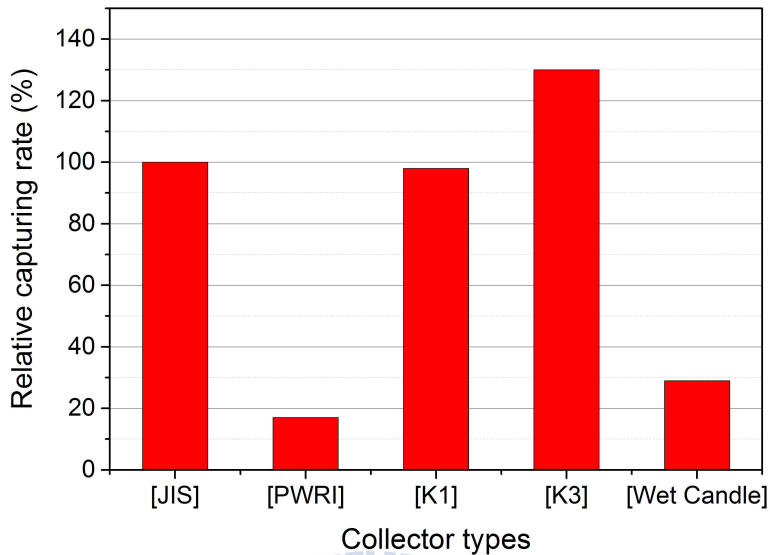


[그림 2-12] [K1], [K3]-Type 포집기(2006, 이종석)

[표 2-2] 포집기별 특징 분류

	[JIS]	[PWRI]	[Wet Candle]	[K3]
포집판	건식거즈	스테인리스	습식거즈	건식거즈
개발	JIS Z 2382	일본토목연구소 (1993)	ISO 9225 ASTM G 140	이종석(2006)
방향	1방향	1방향	전 방향 (방향성 부여×)	1방향
기타	대기 중 비래염 분 측정기준	[JIS]의 포집용 량 한계로 일본 토목연구소에서 자체개발	대기 중 비래염 분 측정기준 이종석의 연구 에서 문제점 지 적(포집용량 한 계)	[PWRI]의 포집 용량 한계로 이 종석 자체개발 기존 포집기별 포집성능 비교

[그림 2-13]는 [JIS]-Type을 기준으로 여타 포집기들의 포집율을 비교한 것이다(이종석, 2006). 이종석 (2006)의 연구결과, [K1]-Type 포집기가 [JIS]-Type과 유사한 포집성능을 가지는 것으로 확인되었다. [K1]-Type은 포집판을 6겹으로 겹쳐 비래염분을 포집하는 원리로 이는 대기 중의 비래염분을 포집하는 효율을 극대화 한 것으로 판단된다. 하지만 [K3]-Type의



[그림 2-13] 포집기별 비래염분 포집율의 비교(이중석, 2006)

경우, [K1]이나 [JIS]-Type에 비해 약 30%이상 더 높은 포집율을 가지는 것으로 보아 [JIS]-Type은 대기 중 비래염분을 약 70% 정도를 포집하는 것으로 판단된다. 한편, [Wet Candle]-Type은 이중석 (2006)의 연구결과, [K3]-Type과 비교해 약 20%의 포집율을 가지는 것으로 나타나 [JIS]-Type에 비하면 26%의 포집율을 가지는 것으로 추산된다.

앞서 분석한 내용과 같이 포집기별로 비래염분의 포집율이 크게 다른 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 포집방식이 상이한 포집기들의 다양성으로 인해 높은 정확도를 가지며 동시에 기준이 되는 데이터를 수집할 수 있는 포괄적인 상용 포집기는 현재까지 없는 실정이다. 앞서 기술한 포집기들의 문제점을 지적하는 연구 결과가 한국뿐만 아니라 일본에서도 다수 제기되어 문제점 보완이 필요하다.

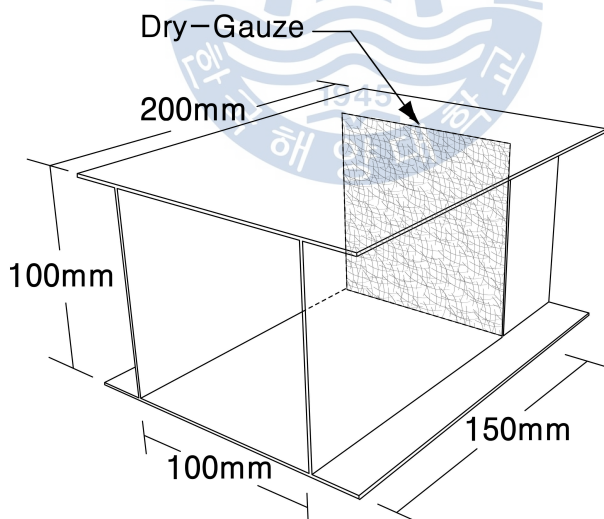
2.3.2 포집기 개발 및 검증

[그림 2-14]은 포집되는 비래염분에 방향특성을 부여하고자 건식거즈 주위로 사각형의 박스 구조물을 둘러 바람길을 유도한 [Upgrade JIS]-Type

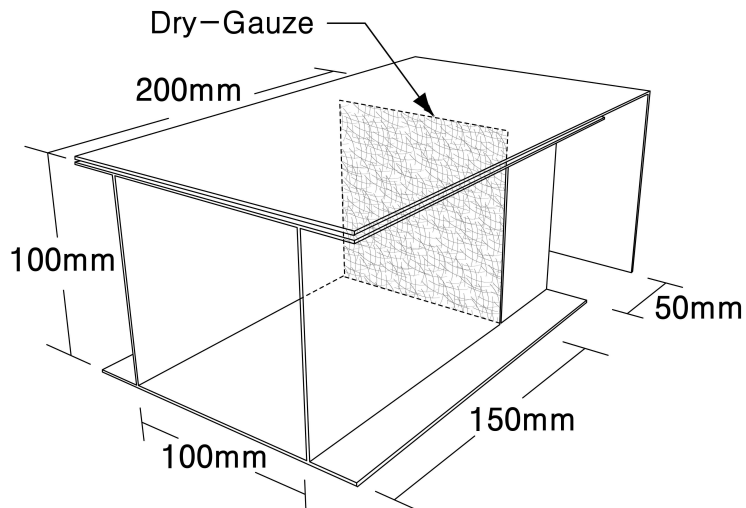
포집기이다.

[그림 2-15]와 [그림 2-16]는 포집기의 뒷면으로 유입되는 바람에 의해, 건식거즈에 부착되어 있던 비래염분의 탈락을 방지하고자 포집기 뒷면에 Back Plate ① 또는 Back Plate ②를 덧댄 포집기의 모습이다.

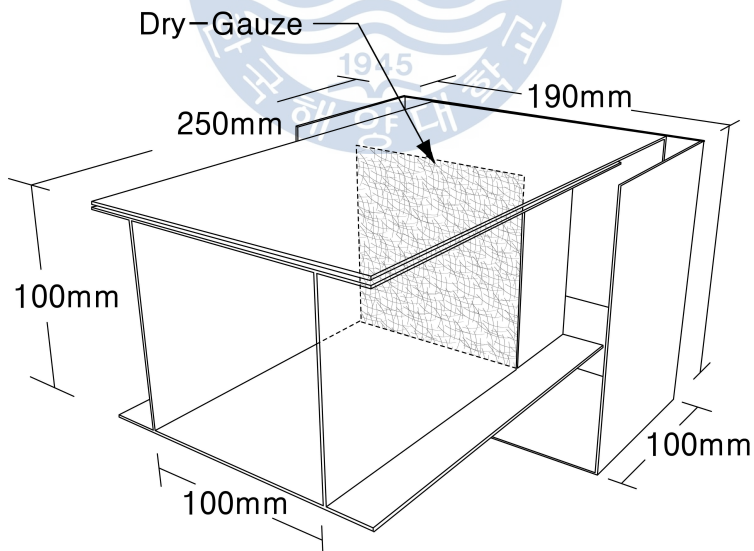
건식거즈의 면적은 100cm^2 이며, 위치는 강우의 영향을 받지 않도록 또한 바람의 방향성을 유도하기 위해 포집기 앞면에서 150mm이격시켜 위치하도록 하였다. 전체 길이는 200mm이며, Back Plate는 포집기 뒷면으로부터 50mm 이격시켜 포집기 내부를 통과하는 바람이 순조롭게 지나갈 수 있도록 유도하였다. 이 포집기는 다방향에서 날아오는 비래염분의 포집이 가능하도록 [그림 2-17]과 같이 8방향으로 등 간격으로 고정되어졌으며, 강우의 영향을 피하기 위하여 상부에 철판을 덧대는 형태로 제작되었다.



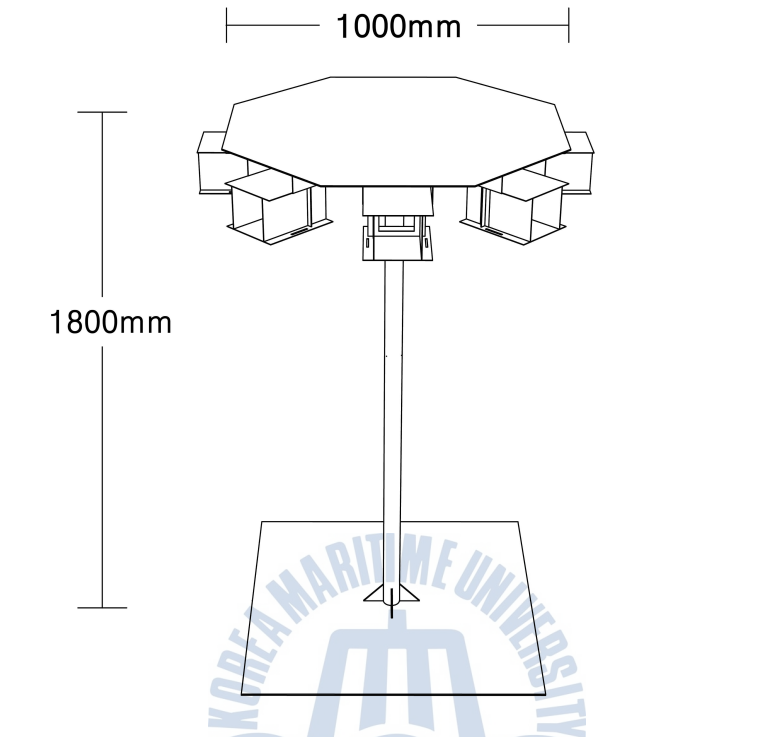
[그림 2-14] [Upgrade JIS]-Type 포집기



[그림 2-15] [Back Plate ①]-Type 포집기

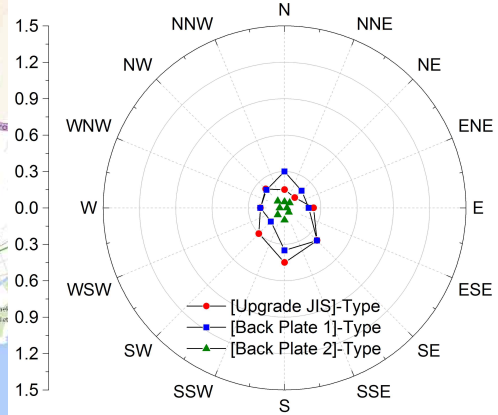
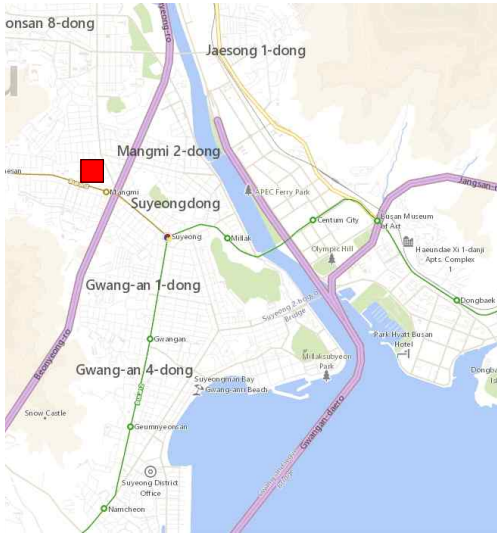


[그림 2-16] [Back Plate ②]-Type 포집기



[그림 2-17] 8방향 포집이 가능하도록 설치된 포집기

[그림 2-18]은 2010년 7월부터 2010년 9월까지 3개월간 각각의 [Upgrade JIS], [Back Plate ①], [Back Plate ②]-Type으로 구성된 다방향 포집기를 통해 측정된 비래염분량을 나타낸 것이다. 모든 포집기에서 동남쪽이 해안을 바라보는 방향임에도 불구하고 반대 방향에서도 비래염분이 측정되었으며 또한 전반적으로 소량만이 포집된 것으로 나타났다. 본 저자는 이를 방향성을 가지지 않는 불규칙성 데이터로 판단하였다. 이것은 포집기 뒷면으로 유입되는 바람을 막기 위해 설치한 Back Plate가 제 기능을 하지 못하였으며, 또한 포집기 앞면에서 유입된 바람이 뒷면의 Back Plate에 의해 저항을 받아 포집기 내부 풍속이 급격히 저하되어 비교적 소량의 비래염분이 포집된 것으로 판단하였다.



(a) 포집 지점

(b) 측정된 비래염분량

[그림 2-18] 포집기별 다방향 비래염분 데이터(7월, 8월, 9월)

(1) 유체 시뮬레이션을 이용한 검증

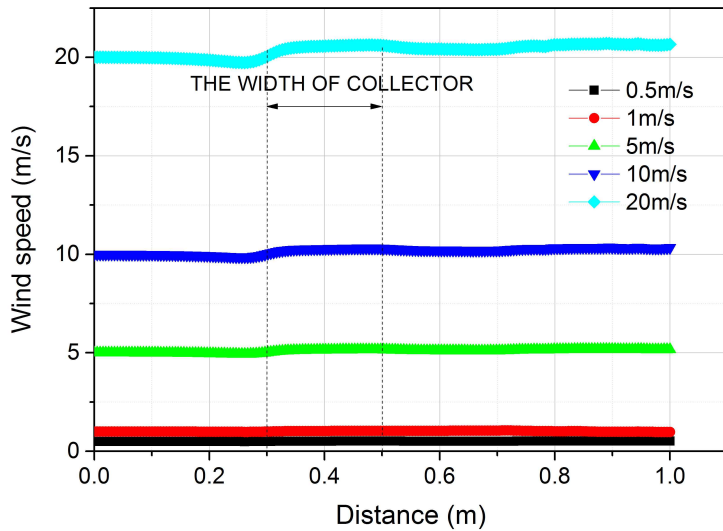
포집기의 개발과정에서 제기된 [Back Plate ①]-Type과 [Back Plate ②]-Type 포집기의 문제점을 검증하였다. 포집기의 앞면 또는 뒷면으로 바람이 유입되었을 경우, 포집기 내부를 통과하는 바람의 유동변화를 유체 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

유체 시뮬레이션 해석에 사용된 방정식은 나비에스토크 방정식으로 비압축성 유체에 의한 운동을 기술하는 기본 방정식이다. 식(2-1)은 해석에 사용된 구성방정식이며, 식(2-2)는 입력조건을 나타낸 것이다.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot \eta (\nabla u + (\nabla u)^T) + \rho(u \cdot \nabla)u + \nabla p = F \quad (2-1)$$

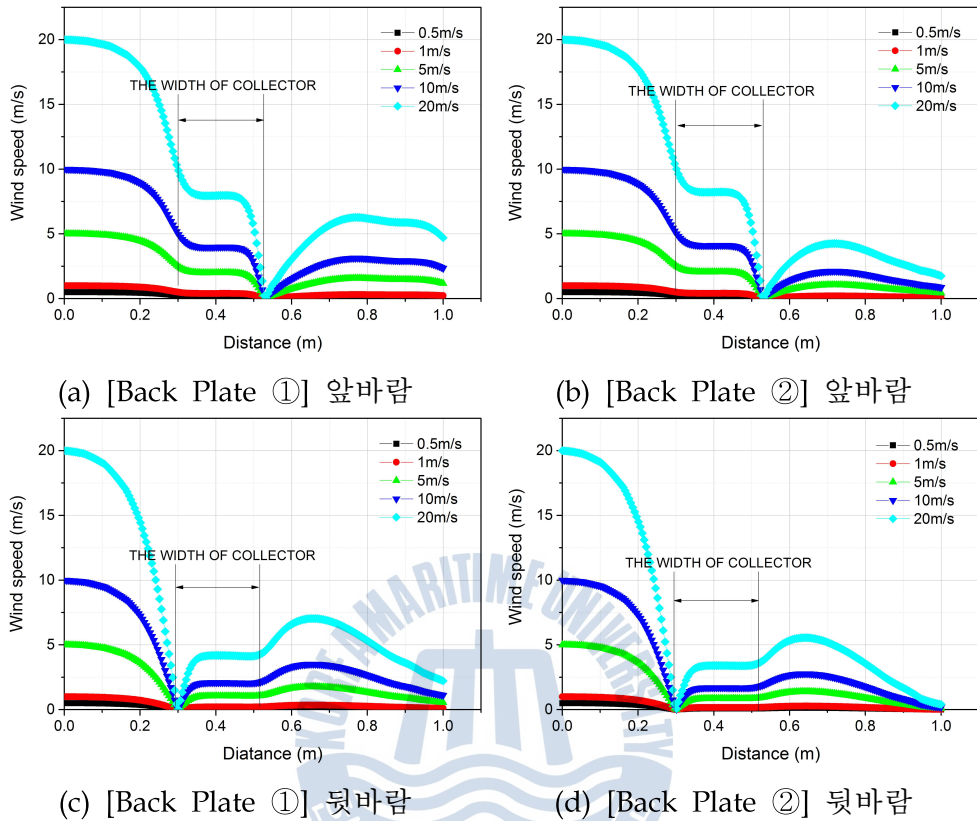
$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2-2)$$

여기서, η 는 동점성율, u 는 속도 벡터, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력을 나



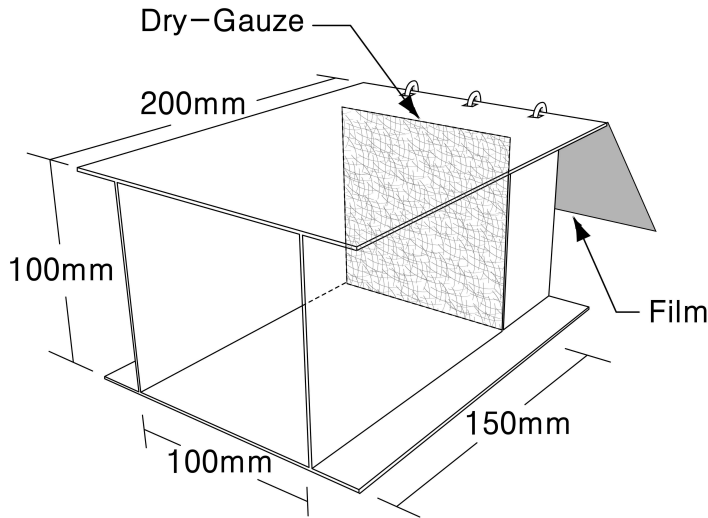
[그림 2-19] [Upgrade JIS]-Type 포집기의 내부 풍속변화

타낸다. 포집기의 앞면과 뒷면에 유입되는 풍속을 0.5, 1.0, 5.0, 10, 20 m/s로 하여 유체 시뮬레이션 해석을 실시하였다. [그림 2-19]은 포집기의 앞면으로 바람이 유입되었을 경우, [Upgrade JIS]-Type 포집기의 내부를 통과하는 바람의 유동변화를 나타낸 것이다. 포집기 내부에서 약간의 풍속의 증가가 나타났으나 비래염분의 포집에 큰 영향을 미칠 정도는 아니라고 생각된다. [그림 2-20(a)]와 (b)는 포집기의 앞면으로 바람이 유입되었을 경우, [Back Plate ①]-Type 및 [Back Plate ②]-Type 포집기의 내부를 통과하는 바람의 유동변화를 나타낸 것이다. 포집기 내부에서 급격히 풍속이 감소하며 Back Plate ①, Back Plate ②를 지난 후, 다시 후류가 형성되는 것으로 나타났다. 포집기 내부의 풍속 감소는 외부 풍속의 약 40% 정도인 것으로 예측되었다. 이것은 포집기 뒷면으로 유입되는 바람을 억제하기 위해 설치한 Back Plate의 존재가 포집기 내부 바람의 흐름을 방해하는 것으로 생각되며, 이는 바람과 함께 날아오는 비래염분이 포집기 내부를 통과할 때, 포집기 내부 풍속의 급격한 감소로 이어져 비래염분 포집량이 다소 과소평가 될 것으로 우려된다. [그림 2-20(c)]와 (d)는 포집기 뒷면으로 바람이 유입되었을 경우, [Back Plate ①]-Type 포집기와



[그림 2-20] [Back Plate ①, ②]-Type 포집기의 내부 풍속변화

[Back Plate ②]-Type 포집기의 내부를 통과하는 바람의 유동변화를 나타낸 것이다. 포집기의 뒷면에서 유입되는 바람을 억제하기 위해 Back Plate ①, Back Plate ②를 설치하였음에도 불구하고 포집기 내부에서 바람의 유입이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 [Back Plate ①]-Type 및 [Back Plate ②]-Type은 포집기 뒷면에서 유입되는 바람을 차단할 수 없는 것으로 판단된다. 따라서 본 저자는 대안으로, 포집기 뒷면에서 유입되는 바람에 의해 부착된 비래염분의 탈락과 측정방향 이외의 비래염분의 유입을 방지하기 위해 고정된 Back Plate의 사용보다 두께 $100\mu\text{m}$ 의 폴리에틸렌 재질의 필름을 포집기 뒷면에 부착하였다. 포집기 뒷면에 부착된 필름은 정면에서 유입되는 바람이 포집기를 통과할 때 열리며, 뒷면에



[그림 2-21] [Open Close]-Type 포집기

서 바람이 유입될 때는 닫히는 원리로 되어 있다. [그림 2-21]은 고안된 [Open Close]-Type 포집기의 모식도를 나타낸 것이다.

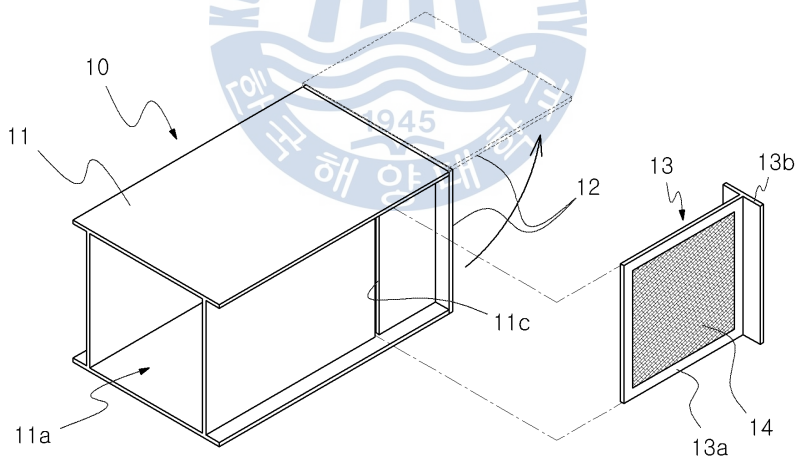
(2) 축진 비래염분 포집실험을 통한 검증

고안한 [Open Close]-Type 포집기의 신뢰도를 검증하였다. [그림 2-22]는 포집기의 개선과정 중 고안된 포집기별로 인공 비래염분 포집 실험을 통해 포집된 인공 비래염분량을 나타낸 것이다. 48시간동안 인공 비래염분을 포집하였다. [Open Close]-Type의 경우에는 포집된 인공 비래염분이 $20.18\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ 로서 [Upgrade JIS]-Type과 거의 차이가 없었지만 [Back Plate ①], [Back Plate ②]-Type의 경우에는 상당히 낮은 비래염분량이 측정되었다. 이는 Back Plate의 영향으로 포집기 내부의 풍속변화가 원인인 것으로 생각되며, 폴리에틸렌 필름을 사용한 [Open Close]-Type의 경우에는 [Upgrade JIS]-Type과 비교 시 차이가 없는 것을 실험을 통해 입증하였다.

[그림 2-23]은 최종으로 개발된 [Open Close]-Type 포집기를 나타낸 것



[그림 2-22] 개선 포집기별 비래염분 포집량



[그림 2-23] [Open Close]-Type 포집기(상세도)

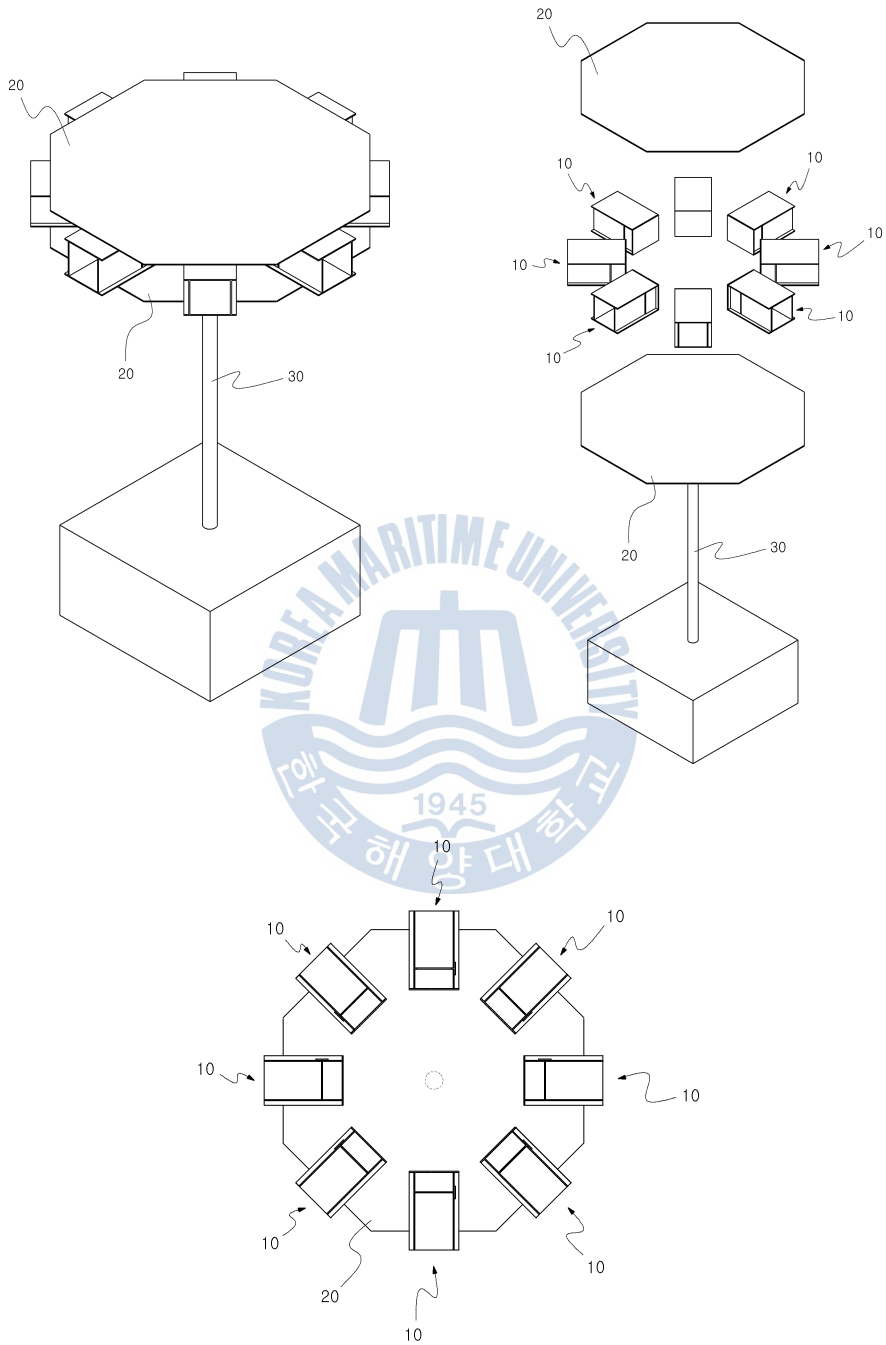
이다. 포집기 본체(10)는 전후 단에 각각 유입구(11a)와 배기구(11b)가 형성된 통 형상으로 구성된 케이스(11)와 상기 케이스(11)의 배기구(11b)에 설치되어 배기구(11b)를 개폐하는 개폐커버(12)와 상기 케이스(11)에 탈착

가능하게 결합되는 고정판(13)과 상기 고정판(13)에 설치된 거즈(14)로 구성된다. 상기 개폐커버(12)는 상기 케이스(11)의 배기구(11b)에 비해 넓은 사각형의 폴리프로필렌 재질의 시트를 이용하며, 상단이 상기 케이스(11)의 배기구(11b) 상측에 회동가능하게 힌지 결합되어, 본체의 유입구(11a) 쪽으로 바람이 유입되면 바람에 의해 하단이 후방으로 밀려 상측으로 회동되므로 바람이 배기구(11b)를 통해 외부로 배출되도록 하고, 배기구(11b)로 바람이 유입될 경우 배기구(11b)를 막아 바람이 배기구(11b)로 역류되는 것을 방지한다. 특히, 상기 개폐커버(12)는 폴리프로필렌 재질의 시트로 구성되므로, 매우 가벼워 바람에 의해 배기구(11b)를 신속하게 개폐할 수 있을 뿐 아니라 염분이 표면에 달라붙거나 부식되지 않으므로, 장시간 사용하여도 개폐커버(12)의 기능이 저하되는 것을 방지할 수 있는 장점이 있다.

2.3.3 다방향 포집기

[그림 2-24]은 개발된 다방향 포집기를 나타낸 것으로, 바람에 의해 운반되는 비래염분을 포집하는 복수개의 포집기 본체(10)와, 포집기 본체(10)를 고정하는 지지패널(20)로 구성된다.

이와 같이 구성된 다방향 비래염분 포집기는 바람에 의해 운반되는 비래염분을 포함하는 포집기 본체(10)가 서로 다른 방향을 향하도록 방사방향으로 배치되므로, 한쪽방향에서 불어오는 바람에 함유된 비래염분만을 포집할 수 있도록 된 종래의 비래염분 포집기와 달리, 임의의 방향에서 불어오는 바람에 함유된 비래염분을 모두 포집할 수 있는 장점이 있다. 또한, 상기 포집기 본체(10)의 케이스(11)에는 배기구(11b)를 막아 바람이 역류하는 것을 방지하는 개폐커버(12)가 구비되므로, 바람이 케이스(11)의 배기구(11b)를 통해 역류하여 거즈(14)에 포집된 염분을 털어내는 것을 방지할 수 있어, 대기 중의 비래염분량을 더욱 정확히 측정할 수 있는 장점이 있다.



[그림 2-24] 다방향 포집기(상세도)

2.4 소결

축진 비래염분 시뮬레이터는 급기팬, 해수저수조, 시편거치대의 거리조정 및 급기팬과 해수저수조의 외부공기유입량을 조절함으로서 인공 비래염분량을 제어할 수 있는 구조로 이루어져 있다.

- 1) 급기팬에서 바라볼 때 좌측에 위치한 포집기에서 비래염분량이 증가하는 것은 급기팬에서 공급되는 바람이 회전에 의해 유입된 결과이며, 5일간 인공 비래염분을 측정한 결과 평균 $7.66\text{mg/dm}^2/\text{day}$ 의 비래염분이 발생되는 것을 확인하였다.
- 2) 이는 실환경 폭로시험장에서 측정된 값이 $0.15\text{mg/dm}^2/\text{day}$ 임을 감안할 때, 약 50배 빠른 속도로 축진이 가능하며, 본 논문 6장의 폭로부식시험에서 무도장과 우레탄도장이 각각 3.29mg/dm^2 , 6.60mg/dm^2 에서 부식되었으므로 축진 비래염분 시뮬레이터를 이용할 경우 1일 이내에 그 값에 상응하는 실험 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.
- 3) 부식속도는 산소와 수분의 공급속도에 지배되므로 비래염분에 노출된 후 다소 시간이 소요될 것으로 생각되나 부식에 필요한 임계 비래염분량 도출은 단시간에 가능할 것으로 판단되며, 비말대 구조물의 내염설계에 유용이 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

해안지역에 건설되는 구조물의 내염설계를 위해서는 대기 중의 비래염분량 조사가 필수적이다. 현재까지 [JIS]-Type과 [PWRI]-Type을 주로 사용해 왔으나 포집기 자체의 결함으로 포집 정확도에 문제가 있어 기준이 되는 포집기의 개발이 중요하였다. 본 2장의 연구 결과, [JIS]-Type 포집기는 실제 대기 중의 비래염분량보다 적은 양이 측정된다는 문제점을 착안하여 이를 보완하는 포집기를 개발한 후 검증하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) [JIS]-Type은 포집기 뒷면에서 유입되는 바람으로 인해 건식거즈에 부착된 비래염분이 탈락되었다.

- 2) 포집기 뒷면에서 유입되는 바람을 억제하기 위해 고안한 [Back Plate ①], [Back Plate ②]-Type은 포집기 내부의 풍속을 감소시켜 비래염분 포집량의 감소를 유발하였으나 폴리에틸렌 필름을 적용한 [Open Close]-Type 포집기의 경우 후풍의 영향을 배제함과 동시에 정확한 포집량을 얻을 수 있었다.
- 3) 후풍의 영향이 억제되는 포집기의 개발을 통해 다방향(8방향)에서의 비래염분 포집이 가능해 졌으며, 8방향에서의 비래염분 포집은 대기 중 비래염분의 분포 및 유동특성을 더욱 정확히 분석하는데 도움을 줄 것으로 생각된다.



제 3 장 해안지역 대기 중의 비래염분 정량화

3.1 개론

앞서, 비래염분과 관련한 국내외 연구동향을 검토한 결과, 비래염분의 유동은 지역별로 지형 및 기후조건에 의해 변동이 큰 것으로 보고되었다. 특히, 비래염분 정량화를 위한 기존연구들은 [JIS]-Type 및 [PWRI]-Type 포집기를 통해 측정된 비래염분량을 바탕으로 해염지도 제작 및 비래염분의 분포를 예측하는 모델링을 주로 실시하는 경향이였다. 하지만 앞선 두 포집기는 1방향에 대해서만 비래염분을 포집하는 원리로 [2장 비래염분 정량화를 위한 시험장치 개발]에서 제시한 문제점을 내포하고 있어, 결과 데이터의 정확도가 다소 떨어지는 것으로 사료된다. 불규칙적으로 날아오는 비래염분에 방향특성을 부여하기 위해서는 1방향이 아닌 8방향 방식이 적용되어야 할 것으로 생각되며, 그 장치로는 본 연구에서 개발한 다방향 포집기가 합당할 것으로 사료된다. 이에 본 3장에서는 개발된 다방향 포집기를 실제 해안지역(부산, 인천) 5개소에 1년간 설치하여, 측정된 비래염분량을 토대로 해안지역에 위치한 구조물의 입지조건(계절, 방향, 거리, 높이)별로 비래염분의 정량화를 실시하고자 한다.

한편, 비래염분의 실측을 통해 그 분포특성을 조사하려는 연구를 제외한 대다수의 연구들은 비래염분의 유동특성을 풍황(風況)의 예측으로 대신하여 평가하는 경우가 많다(村上周三 外, 2003; 廣瀬望 外, 2008). 예를 들어 일본에서는 국소풍황예측시스템(村上周三 外, 2003)이 개발되어 국소적인 풍황맵을 작성, 비래염분의 유동특성을 예측하고 있지만 이는 대기 중에 분포하고 있는 비래염분의 유동을 간접적으로 예측하고 있을 뿐, 실

질적인 정량화를 위한 연구는 미흡한 상태이다. 이는 해안가에서 최초 발생된 비래염분이 구조물까지 전달되는 과정에서 그 양에 변동을 주는 외부 기상조건(풍향, 풍속, 강우)들이 매우 다양하여 분석에 어려움이 있기 때문이다. 이에 본 저자는 비래염분 전달과정의 시점별 분류에서 전송시점 비래염분량에 가장 큰 영향을 미치는 기상조건(풍향, 풍속, 강우)과 비래염분의 상관성 분석을 통해 정량화 가능성을 검토하고자 한다.

3.2 실험 개요 및 방법

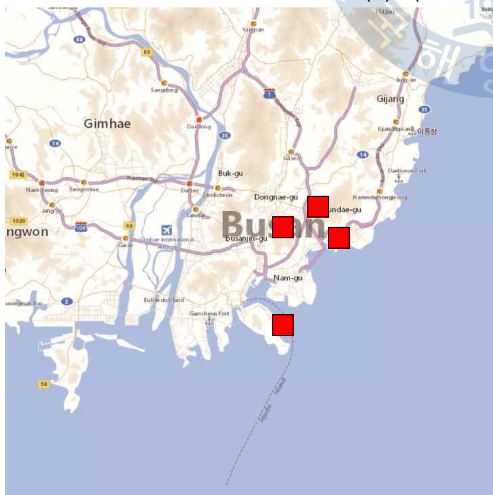
실제 해안지역 5개 지점에서 비래염분 포집을 실시하였다. [표 3-1]은 비래염분을 포집한 지점의 지리조건을 나타낸 것이다. 해안에서 다방향(8방향) 포집기가 설치된 지점까지의 이격거리(km)와 포집기가 설치된 높이(m)를 나타내었다. [그림 3-1]은 비래염분을 포집한 위치를 나타낸 것이다.

[표 3-1] 비래염분 포집 위치의 지리조건

	위치	해안선에서 최단거리 (km)	해안에서 최단거리 시 방향 (유효방향)		높이별 포집기 설치높이 (m)	풍향풍속계 설치 유무	측정시기	
							비래염분	기상 데이터
A	망미동, 수영구, 부산, 대한민국 P아파트	2.7	SE	8.8 km	—	—	2011.03~2012.02	
			S	2.7 km			(1회/월)	기상월보
			SW	8.5 km				
B	재송동, 해운대구, 부산, C아파트	3.4	SE	3.4 km	—	—	2011.03~2012.02	
			S	3.6 km			(1회/월)	—
			SW	7.1 km				
C	우동, 해운대구, 부산, 대한민국 A아파트	0.085	SE	0.085 km	16, 157.7	—	2011.03~2012.02	
			S	0.091 km			(1회/월)	—
			SW	0.086 km				
D	동삼동, 영도구, 부산, 대한민국 K대학교	0.03	N	0.036 km	3.6, 7.1, 10.6, 14.1	○	2011.12~2012.02	
			NE	0.03 km			(1회/월)	풍향
			E	0.053 km			(1회/10일)	풍속계
E	송도동, 연수구, 인천, 대한민국 E아파트	3.2	N	4.8 km	—	—	2011.03~2012.02	
			NW	4.5 km			(1회/월)	기상월보
			W	3.2 km				

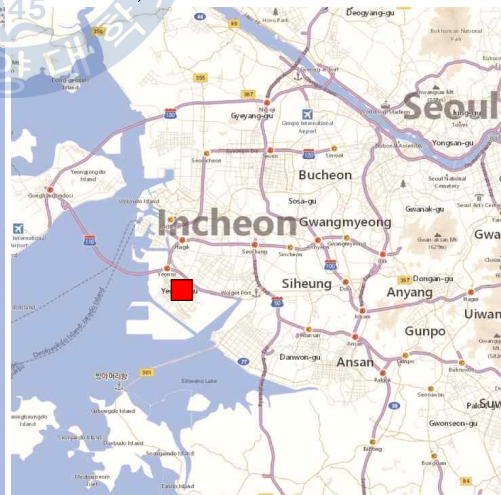


(a) (축척 1 : 100km)



(b) Point A, B, C, D

(축척 1 : 3.2km)



(c) Point E

(축척 1 : 3.2km)

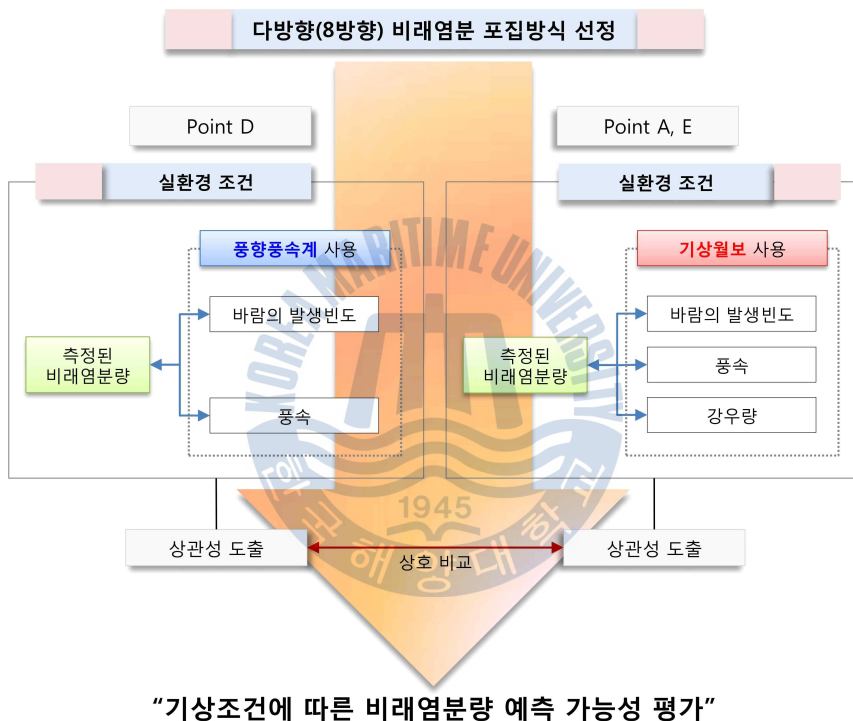
[그림 3-1] 비래염분 포집 위치(대한민국, 부산, 인천)

한국의 기후적인 특색을 간단히 소개하면 다음과 같다. 한국은 3면이 바다로 둘러싸여 있고 아시아 대륙의 동쪽 끝에 자리 잡고 있어 해양성 기후와 대륙성 기후의 특징을 모두 보인다. 특히, 한국은 여름철(6월~8월)에는 연간 강우량의 약 60%가 내려 고온다습한 환경을 가지는 반면 겨울철(12월~2월)에는 연간 강우량의 약 15%만 내려 한랭건조한 날씨가 형성된다. 또한 한국은 북위 33~34도, 경도 124~132도에 위치하여 아시아 계절풍 지역에 속하고 있으므로 계절에 따라 탁월풍(북서풍과 남동풍)이 바뀌게 된다. 일반적으로 한국의 여름철에는 남동계절풍, 겨울철에는 북서계절풍이 분다.

8방향 중에서 해안을 바라보는 3방향을 유효방향으로 선정하였다. 선정의 기준은 다방향 포집기가 설치된 위치에서 해안까지의 이격거리가 최단거리가 되는 3방향을 유효방향으로 선정하였다. 비유효방향의 경우, 유효 3방향과 반대인 3방향을 선정하였다. 비래염분의 포집기간은 2011년 3월부터 2012년 2월까지 12개월 동안 실시하였으며, 월 1회 8방향의 비래염분 포집용 거즈를 수거하여 부착된 비래염분량을 측정하였다. Point D에서는 측정된 비래염분량과 관측된 기상데이터와의 비교를 위해 8방향 포집기와 더불어 풍향풍속계를 설치하였다. 여름에서 겨울로 넘어가는 시점에 부는 계절풍의 변화를 최소화시키기 위해서, 겨울철인 2011년 12월부터 2012년 2월까지 3개월간 실시하여 비교의 정확도를 높였다. 아울러, 포집기의 거즈는 10일 간격으로 수거하여, 총 10차에 걸쳐서 비래염분량을 측정하였다. 또한 높이에 따른 비래염분의 분포특성을 파악하기 위해 Point C 및 Point D를 각각 고층부와 저층부로 구분하여 다방향 포집기를 설치하였다. 저층부는 높이 0~14m의 범위이며, 포집기가 설치된 높이는 3.6m, 7.1m, 10.6m, 14.1m이다. 고층부는 높이 16~160m의 범위이며, 16m와 157.7m 높이에 각각 다방향 포집기를 설치하였다.

한편, 전송시점 비래염분의 정량분석을 위해 다방향(8방향) 포집기와 풍향풍속계(風向風速計)를 동일한 위치에 설치하였다. 측정된 비래염분량과 관측된 기상데이터와의 상관분석을 실시하여 그 상관성을 검토하였다. 또

한 범용성이 높은 기상월보(氣象月報)와 측정된 비래염분량과의 비교를 통해 향후, 기상월보의 데이터를 토대로 대기 중 비래염분의 정량화 가능성을 검토하였다. [그림 3-2]는 기상조건과 비래염분의 상관성 분석을 위한 실험과정을 나타낸 것이다. [그림 3-3]은 비래염분의 포집과 기상관측을 실시하고 있는 전경을 나타낸 것이다.



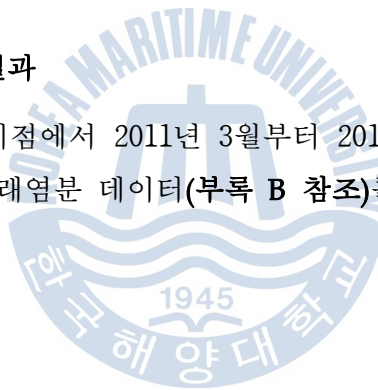
[그림 3-2] 비래염분과 기상조건의 상관분석을 위한 실험과정



[그림 3-3] 비래염분 포집과 기상관측

3.2.1 비래염분 측정 결과

[표 3-2]는 각 5개 지점에서 2011년 3월부터 2012년 2월까지 월별로 측정된 다방향(8방향) 비래염분 데이터(부록 B 참조)를 나타낸 것이다.



[표 3-2] 다방향 비래염분 데이터 (단위 : mg/dm²/day)

지점	방향	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월
A	N	0.434	0.351	0.477	0.136	0.047	0.187	0.322	0.305	0.253	0.684	0.424	0.501
	NE	0.438	0.361	0.428	0.147	0.064	0.144	0.437	0.317	0.273	0.690	0.427	0.522
	E	0.462	0.469	0.425	0.282	0.113	0.245	0.529	0.331	0.276	0.691	0.433	0.563
	SE	0.627	0.486	0.499	0.288	0.237	0.289	0.609	0.379	0.302	0.712	0.444	0.954
	S	0.743	0.689	0.670	0.296	0.445	0.449	0.550	0.502	0.449	0.743	0.560	0.953
	SW	0.664	0.720	0.963	0.234	0.349	0.391	0.435	0.546	0.360	0.851	0.604	0.911
	W	0.681	0.369	0.590	0.186	0.171	0.353	0.362	0.527	0.348	0.803	0.542	0.585
	NW	0.525	0.321	0.488	0.131	0.072	0.208	0.376	0.280	0.310	0.753	0.465	0.473
B	N	0.441	0.343	0.376	0.131	0.050	0.112	0.360	0.143	0.216	0.647	0.451	0.481
	NE	0.443	0.371	0.349	0.109	0.057	0.158	0.411	0.199	0.280	0.646	0.451	0.441
	E	0.455	0.441	0.382	0.150	0.105	0.190	0.491	0.281	0.226	0.656	0.455	0.436
	SE	0.535	0.526	0.413	0.199	0.180	0.229	0.592	0.252	0.247	0.667	0.542	0.411
	S	0.509	0.527	0.414	0.191	0.133	0.354	0.510	0.453	0.483	0.690	0.644	0.647
	SW	0.561	0.508	0.437	0.166	0.059	0.268	0.448	0.361	0.421	0.815	0.704	0.692
	W	0.557	0.377	0.380	0.136	0.055	0.159	0.400	0.214	0.421	0.889	0.681	0.616
	NW	0.519	0.369	0.377	0.132	0.053	0.091	0.379	0.179	0.230	0.826	0.438	0.548
C	N	0.576	0.507	0.538	0.231	0.270	0.139	0.411	0.298	0.318	0.704	0.493	0.504
	NE	0.573	0.467	0.554	0.243	0.278	0.172	0.429	0.244	0.299	0.713	0.516	0.555
	E	0.587	0.808	0.579	0.265	0.355	0.213	0.584	0.317	0.330	0.757	0.548	0.697
	SE	0.609	0.875	0.662	0.353	0.362	0.321	0.660	0.742	0.394	0.881	0.678	0.941
	S	0.634	0.861	0.632	0.311	0.433	0.668	0.814	0.712	0.463	0.841	0.797	0.938
	SW	0.617	0.857	0.588	0.287	0.416	0.422	0.661	0.687	0.371	0.787	0.615	0.895
	W	0.585	0.600	0.582	0.250	0.310	0.219	0.609	0.445	0.324	0.747	0.572	0.561
	NW	0.585	0.590	0.575	0.246	0.254	0.186	0.460	0.242	0.316	0.734	0.519	0.556
D	N	0.714	0.733	0.832	0.437	0.311	0.314	0.771	0.753	0.577	1.111	0.835	1.149
	NE	0.674	0.735	0.887	0.479	0.341	0.565	0.744	0.878	0.711	0.971	1.053	1.094
	E	0.625	0.721	0.786	0.425	0.336	0.340	0.695	0.859	0.676	0.929	0.816	1.204
	SE	0.574	0.719	0.746	0.362	0.269	0.218	0.537	0.608	0.460	0.850	0.621	0.906
	S	0.563	0.602	0.710	0.320	0.181	0.174	0.356	0.599	0.283	0.704	0.547	0.808
	SW	0.561	0.708	0.692	0.339	0.191	0.175	0.363	0.579	0.277	0.724	0.518	0.814
	W	0.523	0.706	0.679	0.340	0.211	0.187	0.392	0.564	0.285	0.758	0.486	0.889
	NW	0.594	0.704	0.741	0.348	0.236	0.198	0.396	0.735	0.354	0.838	0.574	0.904
E	N	0.499	0.457	0.395	0.080	0.174	0.199	0.555	0.314	0.346	0.506	0.651	0.856
	NE	0.486	0.377	0.411	0.074	0.165	0.149	0.433	0.304	0.256	0.249	0.464	0.478
	E	0.440	0.314	0.373	0.086	0.089	0.140	0.338	0.265	0.187	0.188	0.422	0.412
	SE	0.354	0.332	0.319	0.085	0.006	0.147	0.318	0.251	0.173	0.170	0.332	0.494
	S	0.456	0.332	0.363	0.175	0.055	0.202	0.456	0.221	0.143	0.320	0.465	0.498
	SW	0.472	0.350	0.476	0.184	0.139	0.367	0.474	0.302	0.194	0.333	0.516	0.759
	W	0.566	0.507	0.476	0.264	0.229	0.294	0.450	0.347	0.339	0.491	0.495	0.727
	NW	0.642	0.446	0.410	0.234	0.211	0.213	0.538	0.360	0.424	0.560	0.753	0.777

3.2.2 바람의 발생빈도와 풍속 관측

[그림 3-4]는 다방향 포집기의 상부에 설치되어 포집기 주변의 풍향별 바람의 발생빈도와 풍속을 관측할 수 있는 풍향풍속계이다. [표 3-3]은 사용된 풍향풍속계의 제원을 나타낸 것이다. [표 3-4]는 풍향풍속계를 사용하여 관측된 기상데이터를 분석용 기상데이터로 변환하는 과정을 나타낸 것이다. 풍향풍속계가 관측하는 풍향과 풍속은 1분 간격마다 자동 측정되는 것으로서 풍향은 1분 동안의 평균풍향이 1회 측정되는 것(이하, 바람의 발생빈도로 표현)이며 풍속은 1분 동안의 평균풍속으로서 측정되는 것이다.



[그림 3-4] 풍향풍속계(Anemovane)

[표 3-3] 풍향풍속계(Anemovane)의 제원

사양	표시풍속 : 최대풍속, 평균풍속 / 표시풍향 : 평균풍향		
풍속	측정범위 : 0~67m/s	정확도 : $\pm 2\%$	Threshold : 0.45m/s
풍향	측정범위 : 360도	정도 : ± 22.5 도	Threshold : 0.9m/s

[표 3-4] 관측된 기상데이터와 측정된 비래염분 데이터의 변환

지점	기간	유형	실험장치	Raw Data		분석용 데이터
D	2011.12 ~ 2012.02	8 방 향	포집기	10일간 포집된 누적 비래염분량 (mg/dm ²)	▶	1일 비래염분량 (mg/dm ² /day)
			풍향풍속계	1분간 평균풍향 (mean wind direction)		10일간 바람의 발생빈도 (frequency)
				1분간 평균풍속 (m/s)		10일간 평균풍속 (m/s)

[표 3-5] 기상월보의 데이터와 측정된 비래염분 데이터의 변환

지점	기간	유형	실험장치	Raw Data			분석용 데이터		
A E	2011.03 ~ 2012.02	8 방 향	포집기	월별 포집된 누적 비래염분량 (mg/dm ²)			▶	각 방향별	월별 1일 비래염분량 (mg/dm ² /day)
			기상월보	Raw Data	Processing Data				월별 평균풍속 (m/s)
				10분 평균풍속* ¹	일 평균풍속	월 평균풍속			월별 최대풍속 (m/s)
				Raw Data	Processing Data				월별 최대풍향의 발생빈도 (frequency)
				일 최대풍속* ²	월 최대풍속				
				일 최대풍향* ²	월 최대풍향				

※1 : 24시간동안 10분 간격으로 평균풍속 측정 / ※2 : 24시간 중 임의의 10분간 최대풍속

3.2.3 기상월보의 관측자료

기상월보에는 월/일 최대풍향, 월/일 최대풍속, 월/일 평균풍속으로 기록되어 있다. [표 3-6]은 실험기간동안 기상월보에 수록된 데이터를 정리한 것이다. [표 3-5]는 기상월보에 기록되어 있는 Raw 데이터를 본 연구에서의 분석용 데이터로 변환하기 위한 과정을 나타낸 것이다. 여기서 일평균

[표 3-6] 기상월보에 기록된 기상데이터

		3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월
평균 기온 (℃)	인천	4.2	10.0	16.8	20.0	23.9	25.0	21.7	14.8	11.4	0.4	-1.9	-1.2
	부산	7.4	13.1	17.3	21.3	25.1	25.8	23.3	17.6	14.1	4.4	2.8	2.8
상대 습도 (%)	인천	59	66	65	79	86	81	64	59	66	54	52	47
	부산	43	59	70	79	79	78	66	58	60	41	42	45
최대 풍속 (m/s)	인천	11.5	9.9	8.5	9.8	9.3	10.3	8.3	9.8	12.3	12.8	13.0	11.9
	부산	11.0	14.5	12.0	12.1	13.6	11.1	9.8	10.0	9.8	9.6	10.4	10.6
평균 풍속 (m/s)	인천	4.2	3.4	2.9	2.8	2.4	2.3	2.5	2.2	3.1	3.5	3.4	3.8
	부산	3.6	4.3	3.5	3.3	3.4	3.4	3.1	2.7	2.7	3.2	3.4	3.0
최대 빈도 풍향	인천	NNW	WNW	SW	SW	WNW	S	NNW	NNW	NW	NNW	NNW	NNW
	부산	W	SW	SSW	SSE	SW	SSW	NNE	WSW	WSW	WNW	WSW	WSW
강우량 (mm)	인천	14.5	127.6	44.2	307.6	864.2	208.4	26.4	30.3	55.7	7.1	4.0	0.0
	부산	31.2	100.0	170.0	243.2	418.1	110.0	56.8	142.5	128.7	7.2	19.5	22.1

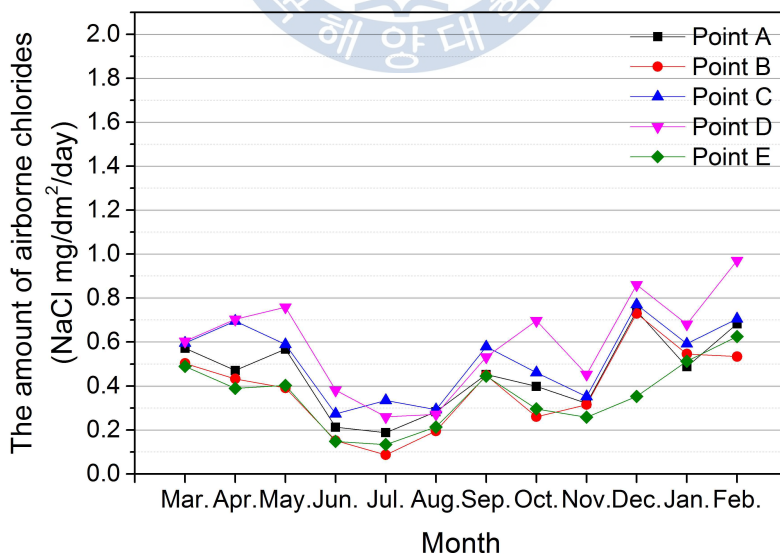
풍속은 24시간동안 10분 간격으로 평균풍속(이하, 10분 평균풍속)을 측정하여 측정된 144개의 10분 평균풍속 값을 다시 24시간 단위로 평균한 것이다. 또한 일 최대풍향과 일 최대풍속은, 1일 24시간 중 임의의 10분간 평균으로, 가장 세게 불었던 풍속과 그때의 풍향을 의미한다.

3.3 포집 결과 및 분석

3.3.1 비래염분의 분포특성

(1) 계절별

[그림 3-5]는 5개 지점에서 1년간 포집된 8방향의 비래염분(8방향 평균)을 월별로 나타낸 것이다. 여름철인 6월에서 8월은 포집된 비래염분량이 적은 것으로 확인되었다. 이는 한국의 경우, 여름철에 발생하는 장마의 영향으로 비래염분이 강우에 의해 낙하되어 전반적으로 대기 중의 비래염분량이 감소된 것으로 생각된다. 상대적으로 겨울철인 12월에서 2월은 한랭건조하며 강우발생의 횟수도 적기 때문에 대기 중의 비래염분량이 증가

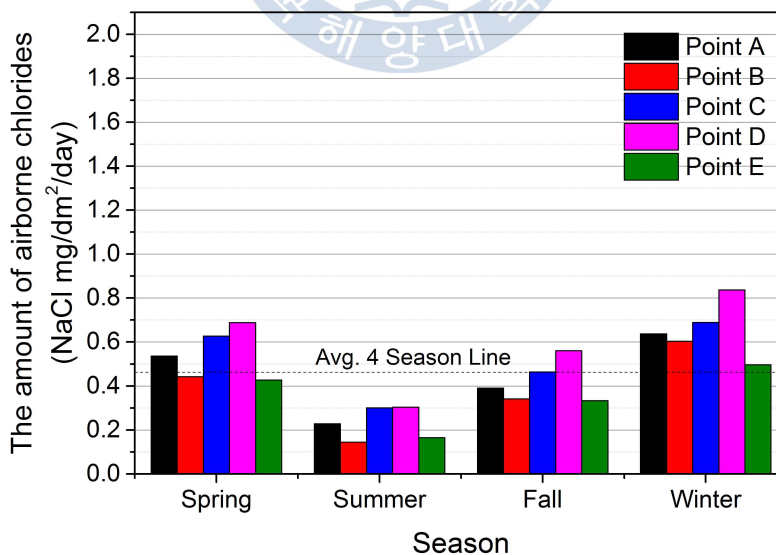


[그림 3-5] 월별 비래염분 분포(8방향 평균)

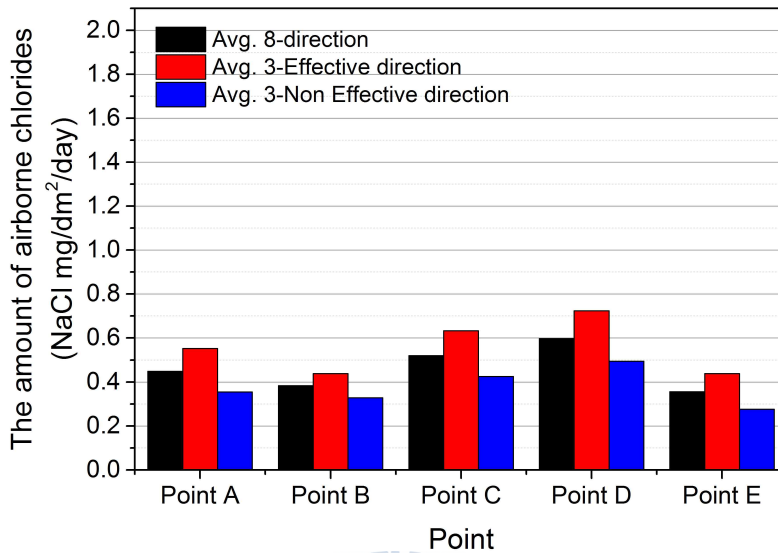
한 것으로 추정된다. [그림 3-6]은 1년을 4계절로 구분하여 포집된 비래염분을 나타낸 것이다. 1년의 평균 비래염분량($0.49\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$)에 비해 봄철(3월~5월)은 1.18배, 여름철(6월~8월)은 0.49배, 가을철(9월~11월)은 0.91배, 겨울철(12월~2월)은 1.42배의 비래염분이 포집된 것을 확인하였다.

(2) 방향별

[그림 3-7]은 5개 지점에 있어 8방향에서 포집된 비래염분을 전체 8방향 평균, 유효 3방향 평균, 비유효 3방향 평균으로 분류하여 나타낸 그래프이다. 기존 연구들의 포집방식인 해안을 바라보는 방향에만 1방향 포집기를 설치하여 측정한 비래염분량 조사와는 달리 해안을 바라보는 방향인 유효방향뿐만 아니라 타 방향에서도 비래염분이 골고루 포집됨을 확인할 수 있다. 5개 지점 모두 유효방향이 비유효방향에 비해 비래염분이 많이 포집된 것을 확인할 수 있다. 유효 3방향 평균은 전체 8방향 평균의 1.2배, 비유효 3방향 평균은 8방향 평균의 0.8배, 유효 3방향 평균은 비유효 3방향 평균의 1.5배의 관계가 있는 것으로 확인하였다. 이것은 유효방향에서 포집된 비래염분의 경우, 비래염분의 발생 근원지의 방향이며 해풍



[그림 3-6] 계절별 비래염분 분포(8방향 평균)

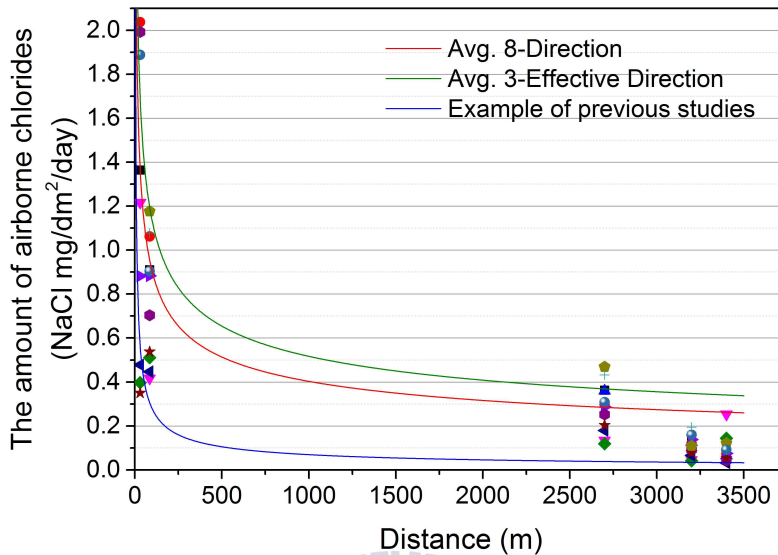


[그림 3-7] 전체 8방향 평균, 유효 3방향 평균과 비유효 3방향 평균
비래염분량 비교(1월~12월 각 방향별 평균)

의 영향이 비래염분 전달에 지배적으로 작용하였을 것으로 추정된다. 반면, 비유효방향에서 포집된 비래염분은 이미 대기 중을 부유하고 있던 비래염분이 해풍보다 세력이 약한 국소적 육풍(해풍은 일반적으로 육풍보다 강하며 풍속은 보통 5~6m/s가 되나 해안의 지형에 따라서는 7~8m/s까지 부는 경우가 있고 내륙으로 들어감에 따라서 약해진다. 반면에 육풍은 2~3m/s밖에 되지 않는다. 해풍은 비교적 강하여 해안에서 내륙 20~50km의 거리까지 불고, 육풍의 범위는 7~10km이다)에 의해서 포집기로 전달되었기 때문에 유효방향에 비해 상대적으로 적은 양이 포집된 것으로 추정된다.

(3) 거리별

[그림 3-8]은 본 연구에서 제안된 포집방식을 적용하여 거리별로 8방향에서 측정된 비래염분량을 나타낸 것이다. 아울러 기존 연구들에서의 비래염분 포집방식인 1방향에서 포집된 비래염분량을 예시로서 함께 나타내었다. 다방향 포집기를 사용하여 포집된 각 방향의 비래염분은 크게 전체



[그림 3-8] 거리별 비래염분의 분포

[표 3-7] 포집방식에 따른 거리별 비래염분 분포식

8방향 포집 방식(다방향 포집기)		1방향 포집 방식*
$C_x = 4.52x^{-0.35}$	$C_x = 5.41x^{-0.34}$	$C_x = 4.39x^{-0.60}$
전체 8방향 평균(회귀)	유효 3방향 평균(회귀)	기존 연구 예시(회귀)

※ [PWRI]-Type 포집기 사용(日本土木研究所, 1993)

8방향 평균, 유효 3방향 평균으로 나누어 해안에서의 이격거리에 따른 비래염분의 분포특성을 분석하였다. 해안에서의 이격거리에 따른 비래염분의 분포특성은 해안으로부터 가까운 거리에서는 비래염분량이 급격히 감소하고 먼 거리에서는 완만히 감소하는 $y = mx^{-n}$ 함수의 형태를 보였다. 기존의 비래염분 관련 연구들에서는 1방향 비래염분 포집방식을 통한 거리별 비래염분량의 분석에서 이격거리가 약 1km 지점에서 비래염분량이 급격히 감소하는 것으로 평가하였다(日本土木研究所, 1993; 風間洋 外, 2004). 하지만 본 연구에서의 결과는 전반적으로 이격거리에 따라 비래염

분량이 감소하는 유사한 경향을 보이지만 2.5km 이상의 지점에서도 상당한 양의 비래염분이 측정되고 있는 것으로 나타났다. 이는 8방향에서 비래염분을 포집하는 방식은 1방향에서 비래염분이 전달됨을 가정하고 있는 기존 연구들의 포집 결과에 주변에 부유하고 있는 비래염분이 함께 도합된 결과라고 할 수 있다. 식(3-1)은 해안에서의 이격거리에 따른 비래염분량을 나타내는 회귀식이다. [표 3-7]은 포집방식에 따라 도출된 회귀 값을 나타낸 것이다.

$$C_x = Ax^B \quad (3-1)$$

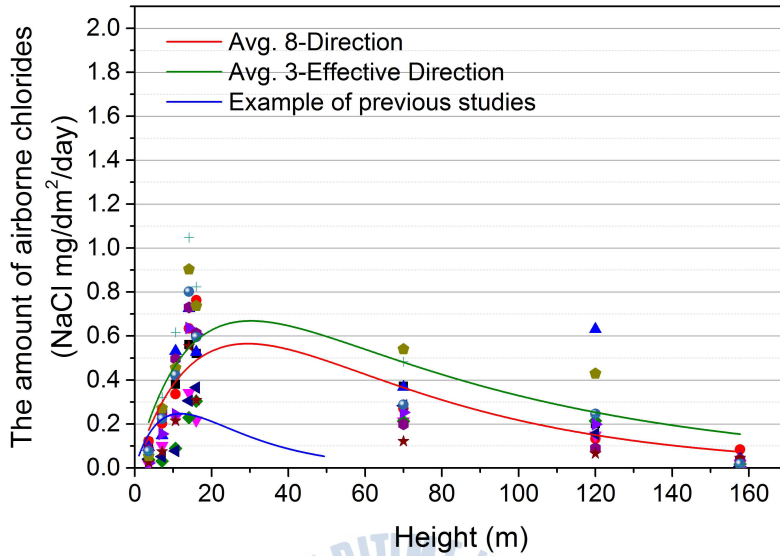
C_x : 해안에서 이격거리 x (m)의 비래염분량 (NaCl mg/dm²/day)

A : 해안에서 이격거리 1m의 비래염분량 (NaCl mg/dm²/day)

B : 회귀계수

(4) 높이별

[그림 3-9]는 본 연구에서 제안된 포집방식을 적용하여 높이별로 8방향에서 측정된 비래염분량을 나타낸 것이다. 과거 높이별 비래염분의 분포 특성에 대해 연구한 風間洋外 (2004)는 이류, 확산해석을 통해 비래염분의 연직분포를 나타내었으며, 해안으로부터 이격거리가 약 200m 내인 지근거리에서는 높이가 약 10~15m까지 비래염분량이 점차 증가하다가 그 이상에서는 점차 감소되는 경향을 보고하였다. 본 연구의 결과에서도 이와 동일하게 지면에서 높이 20~30m까지 비래염분량이 증가하다가 30m 이상의 높이에서는 비래염분이 점차 감소하는 경향을 확인하였다. 이것은 비래염분 전달에 가장 지배적인 영향을 주는 바람의 유동이, 지면의 경우 장해물에 의한 차폐 및 지반의 굴곡으로 인해 마찰계수의 증가로 이어져 비래염분량의 감소가 발생된 것으로 사료된다. 또한 증가 후 감소의 경향은 기존의 연구와 유사하지만 포집방식의 차이로 인해 본 연구에서의 비



[그림 3-9] 높이별 비래염분의 분포

[표 3-8] 포집방식에 따른 높이별 비래염분 분포식

8 방 향	전체 8방향 평균 (회귀)	$C_y = \frac{0.05}{0.05 - 0.02} (e^{-0.02y} - e^{-0.05y})$
	유효 3방향 평균 (회귀)	$C_y = \frac{0.07}{0.07 - 0.01} (e^{-0.01y} - e^{-0.07y})$
1 방 향	기존 연구 예시* (회귀)	$C_y = \frac{0.06}{0.06 - 0.12} (e^{-0.12y} - e^{-0.06y})$

※ [PWRI]-Type 포집기 사용(風間洋, 2004)

래염분량은 보다 높은 값을 가지는 것으로 사료된다.

한편, 약 20m이상의 고층부의 경우, 비래염분은 높이가 증가함에 따라 대기 중으로 비산되는 힘이 부족하여 점차 감소하는 경향을 가지는 것으로 판단된다. 높이가 증가함에 따라 풍속이 강해지는 현상으로 인해 비래

염분의 전달이 용이할 것으로 생각될 수 있으나 실험 결과로 보아 풍속의 증가에 비해 비래염분 입자의 중력낙하의 힘이 더 큰 것으로 추정된다. 식(3-2)는 지면에서의 높이에 따른 비래염분량을 나타내는 회귀식이다. [표 3-8]은 포집방식에 따라 도출된 회귀 값을 나타낸 것이다.

$$C_y = \frac{m}{m-n} (e^{-ny} - e^{-my}) \quad (3-2)$$

C_y : 지면에서 높이 $y(m)$ 의 비래염분량 (NaCl mg/dm²/day)

m, n : 회귀계수

3.3.2 거리와 높이에 따른 비래염분 정량화

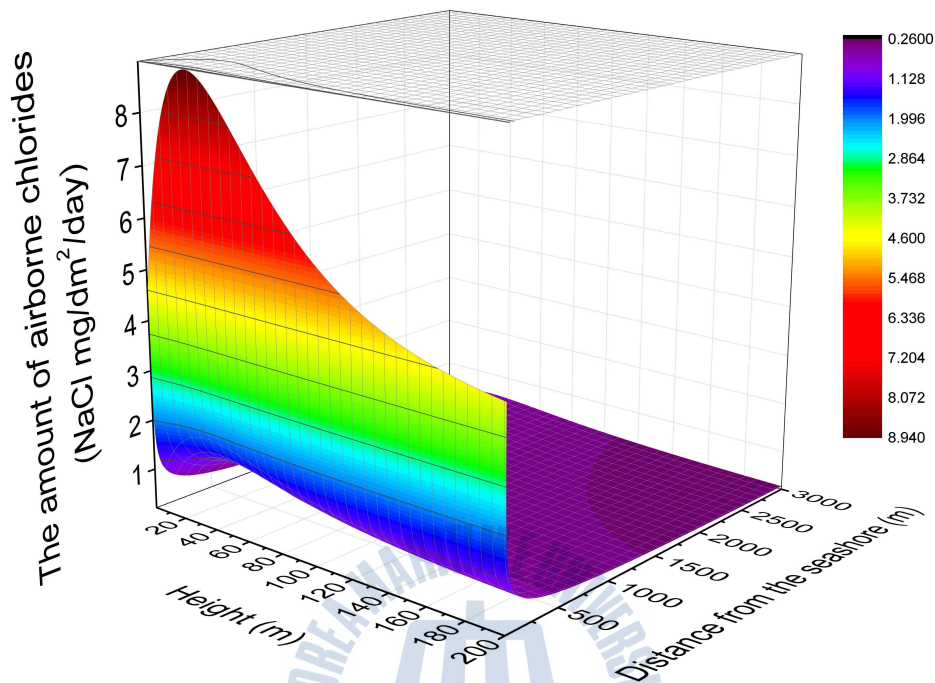
[그림 3-10]은 거리와 높이를 함께 고려한 비래염분의 분포 예측을 식 (3-3)을 통해 도출된 그래프이다.

$$C_{x,y} = [Ax^{-B}] \times \left[\left(\left(\frac{m}{m-n} (e^{-ny} - e^{-my}) \right) \right) \frac{C_{y1}}{C_{y1}} - 1 \right] \times k + 1 \quad (3-3)$$

$C_{x,y}$: 해안선에서 이격거리 $x(m)$, 지반선에서 높이 $y(m)$ 의 비래염분량 (NaCl mg/dm²/day)

C_{y1} : 지반선에서 높이 1m의 비래염분량 (NaCl mg/dm²/day)

k : 일정한 이격거리에 있어서 비래염분의 높이별 증가율 (0.01~0.1)

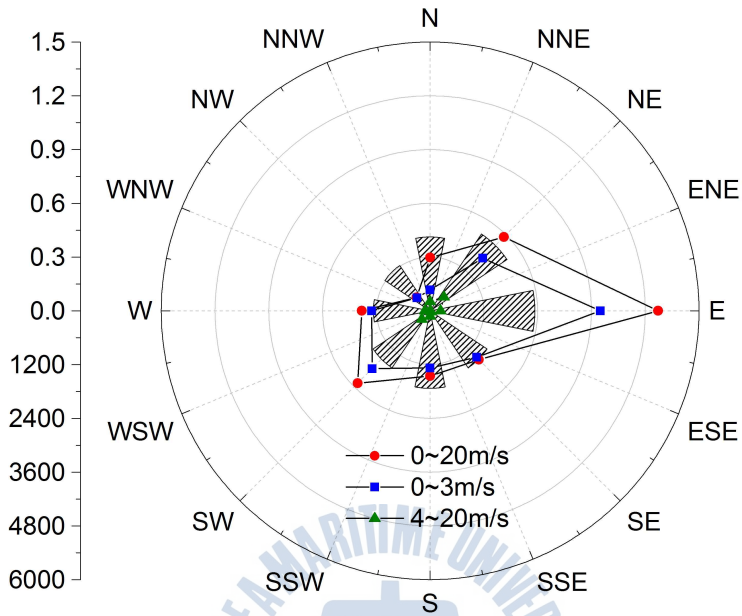


[그림 3-10] 거리와 높이에 따른 비래염분 분포 예측

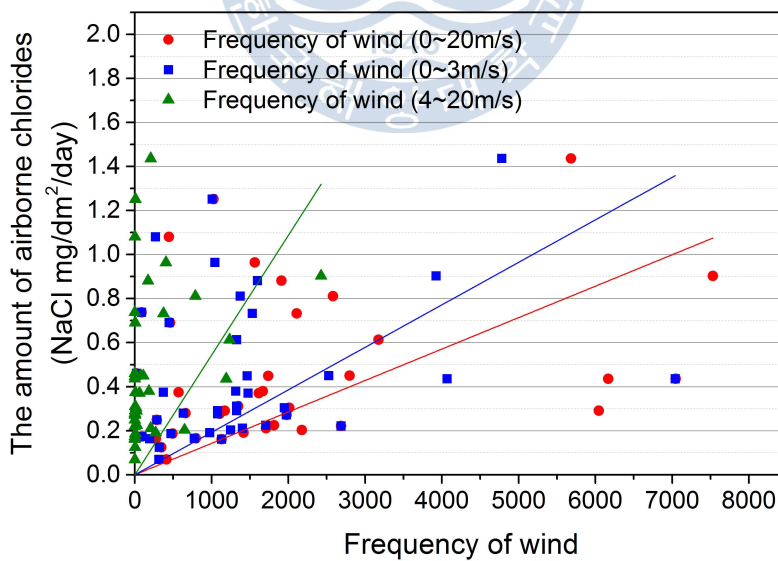
3.3.3 기상조건과 비래염분의 상관성

(1) 바람의 발생빈도(풍향풍속계 사용)와 비래염분

[그림 3-11]은 풍향풍속계를 통해 관측된 풍향별 바람의 발생빈도와 포집된 비래염분의 데이터를 나타낸 그래프이다. 실제 환경에서의 바람의 발생빈도와 풍속은 동시에 발생하는 현상이기 때문에 풍속의 조건을 0~20m/s(전체 풍속범위), 0~3m/s(저속 풍속범위), 4~20m/s(고속 풍속범위)의 3가지 풍속범위로 나누어 각 범위에서의 바람의 발생빈도를 측정하였다. 측정결과, 4~20m/s(고속 풍속범위)에서는 바람의 발생빈도가 극히 드문 것으로 나타났다. 전반적으로 동쪽이 가장 많은 바람의 발생빈도를 나타내었으며, 비래염분 또한 동쪽이 가장 많이 포집된 것으로 나타났다. [그림 3-12]는 3가지의 풍속범위별로 관측된 바람의 발생빈도와 측정된 비래

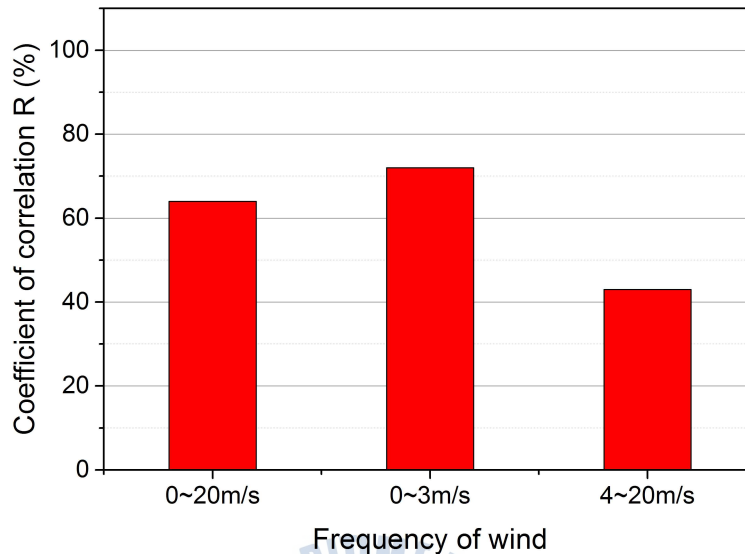


(a) 바람의 발생빈도와 8방향 비래염분



(b) 바람의 발생빈도에 따른 비래염분량

[그림 3-11] 바람의 발생빈도와 비래염분(풍향풍속계 사용)

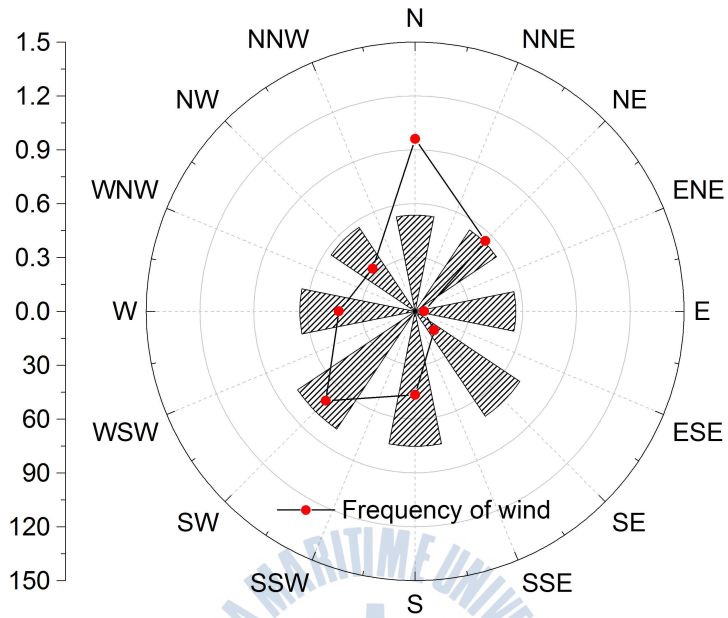


[그림 3-12] 바람의 발생빈도와 비래염분의 상관성(풍향풍속계 사용)

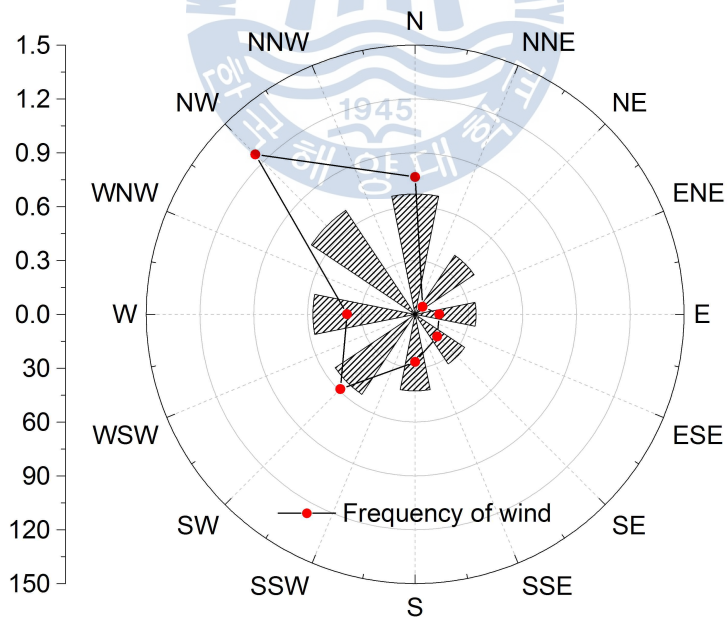
염분량 사이의 상관성을 분석한 그래프이다. 상관분석은 풍속의 조건을 고정한 상태에서 단순히 바람의 발생빈도만을 측정된 비래염분량과 비교하는 편상관관계(partial correlations) 분석을 실시하였다. 바람의 발생빈도와 비래염분량의 상관성은 3가지의 풍속범위에서 최소 43%에서 최대 71% 사이로 나타났다. 그 중 0~3m/s(저속 풍속범위)에서 관측된 바람의 발생빈도와 측정된 비래염분량 사이의 상관성이 71%로 나타나, 다른 풍속범위에 비해 다소 높은 상관성을 가지는 것으로 확인하였다.

(2) 바람의 발생빈도(기상월보 사용)와 비래염분

[그림 3-13]은 2011년 3월부터 2012년 2월까지 1년 동안, 각 방향별로 측정된 비래염분량과 기상월보(2011.03~2012.02)에 기록된 풍향별 바람의 발생빈도를 나타낸 그래프이다. Point A의 경우, 8방향 중 해안을 바라보는 방향인 남쪽에서 가장 많은 비래염분량이 측정되었으나, 기상월보에 기록된 방향별 바람의 발생빈도는 북쪽이 가장 많이 관측되어 서로 상호간의 비교가 어렵다. 하지만 Point E의 경우, 북서쪽이 바람의 발생빈도가



(a) Point A(부산)



(b) Point E(인천)

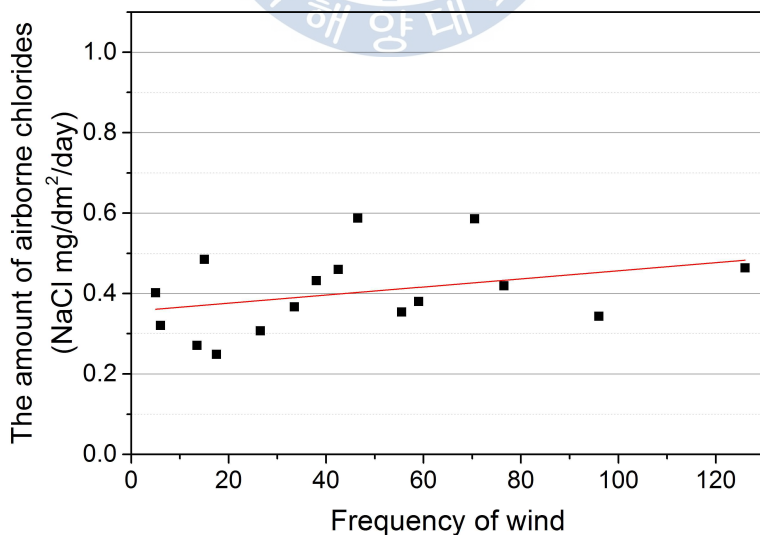
[그림 3-13] 방향별 바람의 발생빈도와 비례염분(기상월보 사용)

가장 많이 관측되었으며, 비래염분 또한 8방향 중 가장 많은 양이 측정된 것을 확인할 수 있다.

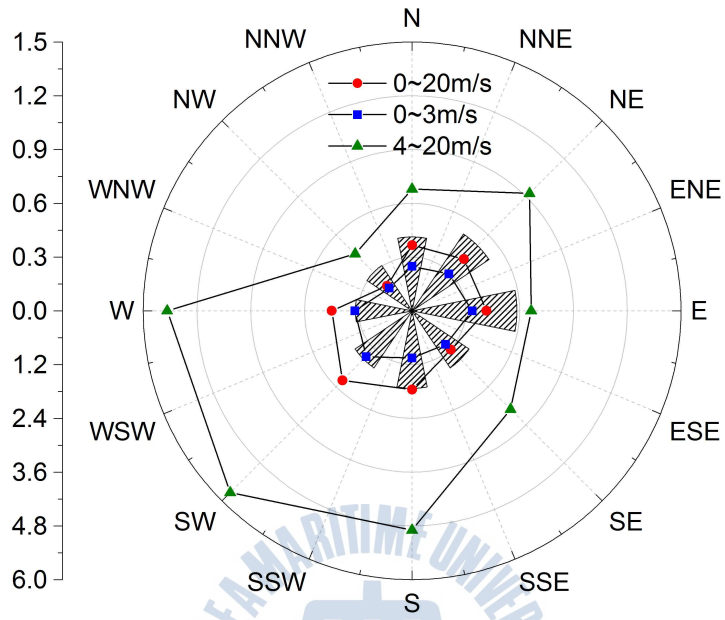
[그림 3-14]는 기상월보에 기록되어 있는 바람의 발생빈도에 따라 1년간 측정된 비래염분량을 나타낸 그래프이다. 바람의 발생빈도가 증가할수록 비래염분량이 조금씩 증가하는 경향을 보이지만, 상관분석을 통해 양쪽의 상관성을 도출한 결과 34%로서 매우 낮은 값을 가지는 것으로 나타났다.

(3) 풍속(풍향풍속계 사용)과 비래염분

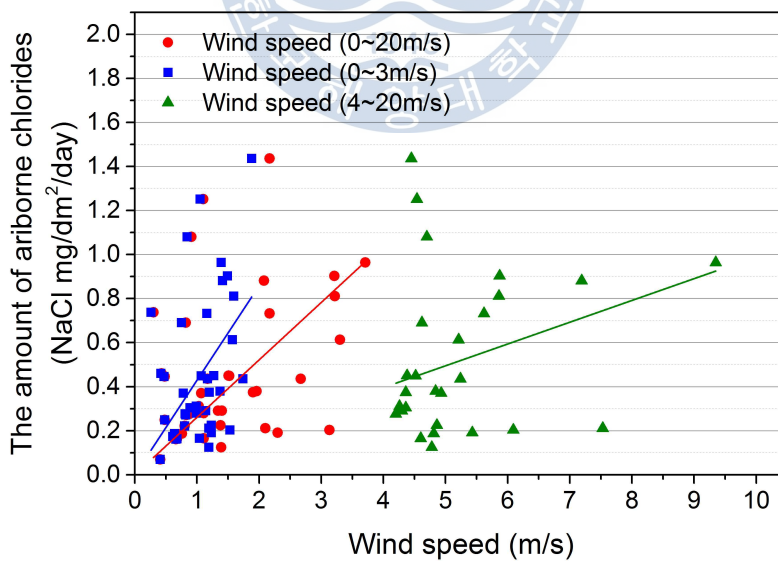
[그림 3-15]은 실환경에서 관측된 풍속과 측정된 비래염분량을 나타낸 그래프이다. 풍속의 범위를 0~20m/s(전체 평균풍속), 0~3m/s(저속 평균풍속), 4~20m/s(고속 평균풍속)의 3가지로 나타내었다. 남서쪽에서 가장 높은 풍속이 관측되었으나 측정된 비래염분량은 동쪽이 가장 많아 양쪽의 비교가 어렵다. [그림 3-16]은 3가지의 풍속 범위별로 관측된 풍속과 측정된 비래염분량 사이의 상관성을 분석한 그래프이다. 상관분석은 바람의 발생빈도를 고려하지 않는 상태에서 단순히 풍속만을 기본으로, 측정된 비래염분량과 비교하는 편상관관계(partial correlations) 분석을 실시하였



[그림 3-14] 바람의 발생빈도와 비래염분의 상관성(기상월보 사용)

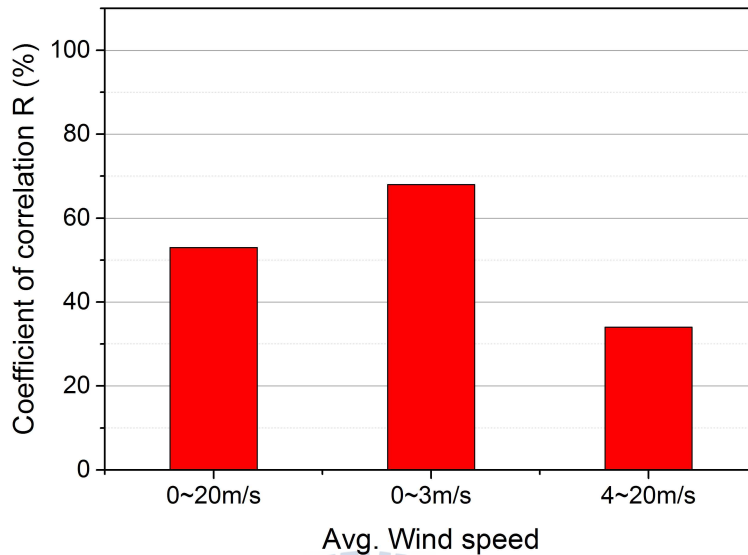


(a) 풍속과 8방향 비래염분



(b) 풍속에 따른 비래염분량

[그림 3-15] 풍속과 비래염분(풍향풍속계 사용)



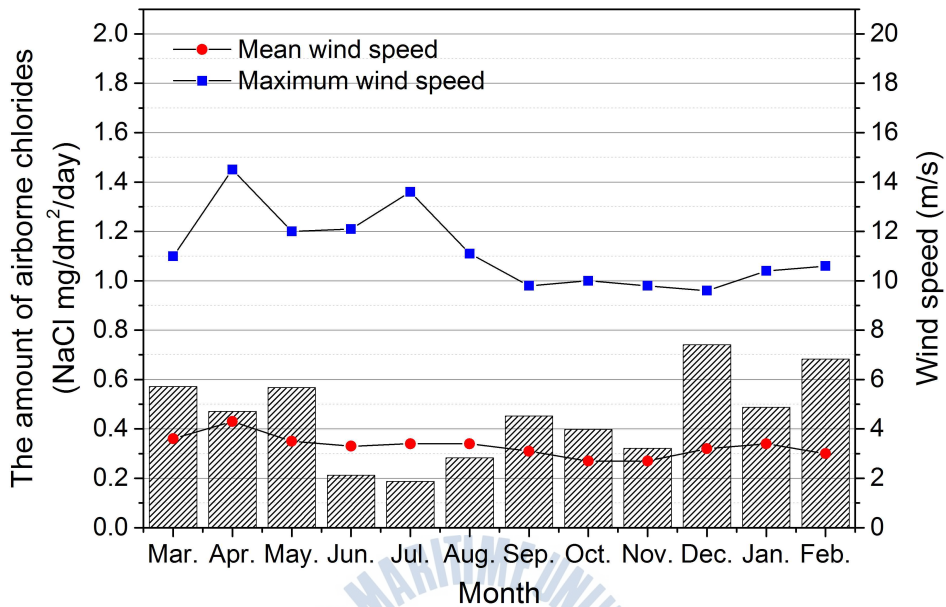
[그림 3-16] 풍속과 비래염분의 상관성(풍향풍속계 사용)

다. 3가지의 모든 풍속범위에서 풍속과 비래염분량의 상관성은 최소 34%에서 최대 68% 사이로 나타났다. 그 중 0~3m/s(저속 평균풍속) 풍속범위에서 관측된 풍속이 측정된 비래염분량 사이의 상관성이 68%로 나타나, 가장 높은 상관성을 가지는 것으로 확인하였다.

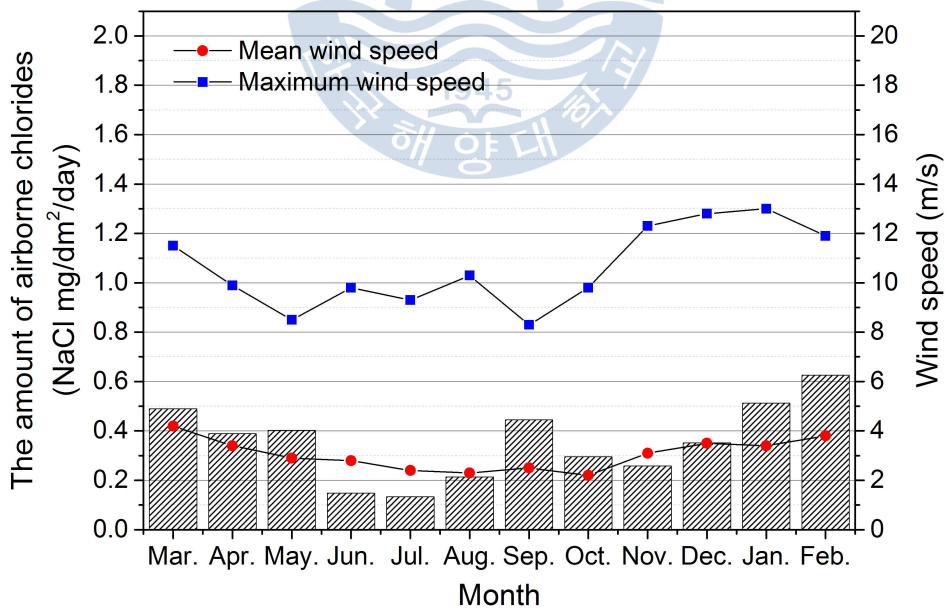
(4) 풍속(기상월보 사용)과 비래염분

[그림 3-17]은 2011년 3월부터 2012년 2월까지 매월 측정된 비래염분량과 기상월보에 기록되어 있는 월별 최대풍속, 평균풍속을 함께 나타낸 그래프이다. 최대풍속은 월별로 큰 편차를 보이는 반면 평균풍속의 경우 편차가 거의 나타나지 않는다. 아울러 월별로 측정된 비래염분량과 최대풍속, 평균풍속 사이의 유사한 경향을 확인하기가 어렵다.

[그림 3-18]은 기상월보에 기록되어 있는 최대풍속, 평균풍속에 따라 측정된 비래염분량을 나타낸 그래프이다. 최대풍속, 평균풍속 양쪽 모두 풍속이 증가할수록 비래염분량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 비래염분의 전달에 추진력이 되는 풍속이 클수록 비래염분이 더 멀리 날아가

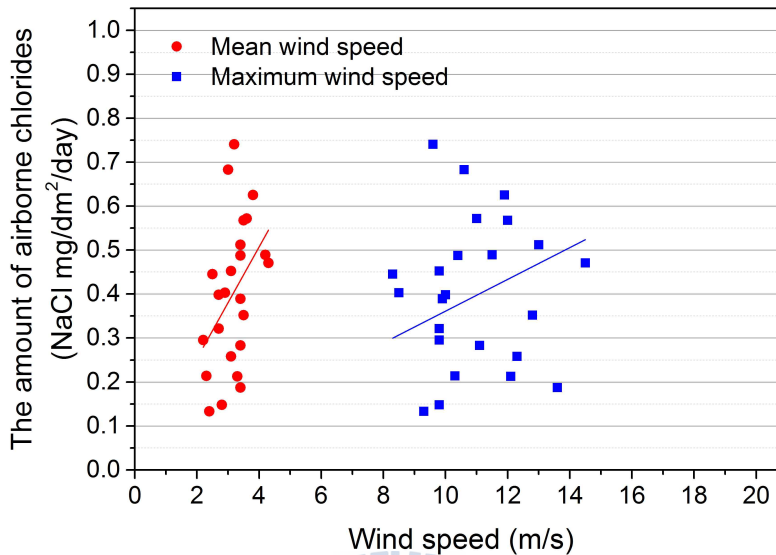


(a) Point A (부산)



(b) Point E (인천)

[그림 3-17] 월별 풍속과 비래염분(기상월보 사용)

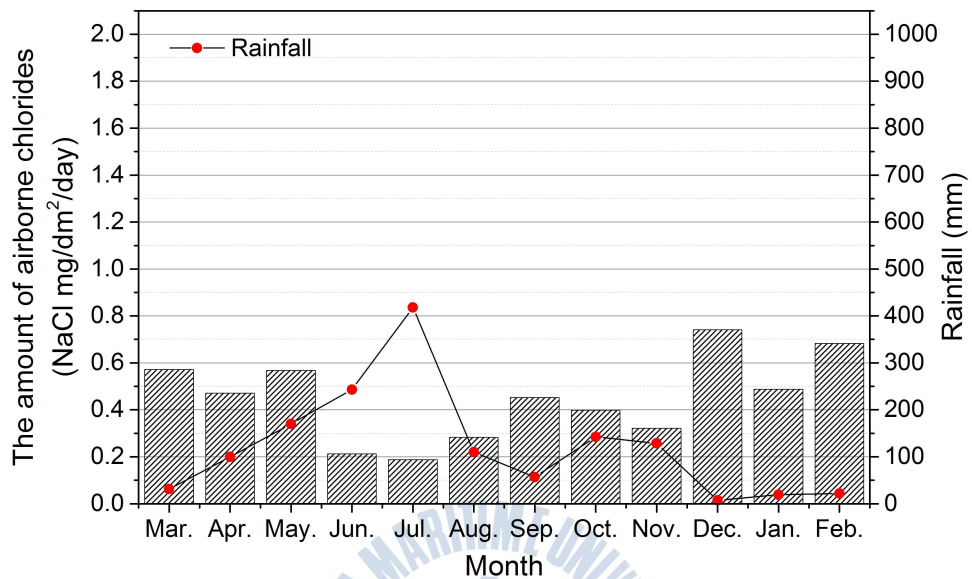


[그림 3-18] 풍속과 비래염분의 상관성(기상월보 사용)

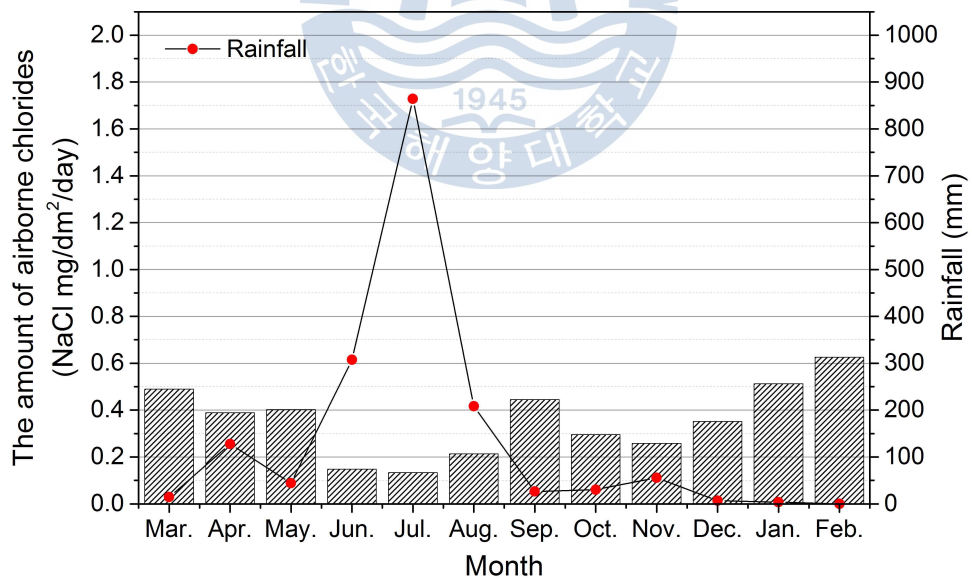
기 때문에 비래염분을 포집하는 포집기에 도달할 확률도 높아져 포집량이 많아진 것으로 생각된다. 최대풍속, 평균풍속과 비래염분량의 상관성은 각각 2%, 45%로 분석되었다. 이에 본 저자는 최대풍속은 비래염분과의 상관관계에서 상관성이 없는 것으로 판단하였다.

(5) 강우(기상월보 사용)와 비래염분

[그림 3-19]은 2011년 3월부터 2012년 2월까지 1년간 월별로 측정된 비래염분량과 기상월보에 기록되어 있는 월별 강우량을 함께 나타낸 그래프이다. Point A, Point E 모두 강우량이 증가할수록 측정되는 비래염분량은 감소하는 반비례 관계를 나타내고 있다. 일반적으로 한국은 6월에서 8월에 이르는 여름철에 집중적인 호우가 발생되고 있으며, 이에 비래염분량 또한 급격히 감소되는 것을 확인할 수 있다. 한편 12월에서 2월에 이르는 겨울철의 경우, 강우가 거의 발생하지 않는 건조한 시기로서 강우의 영향이 적어 여름철에 비해 상대적으로 많은 양의 비래염분이 대기 중에 분포하고 있는 것으로 판단된다.



(a) Point A(부산)

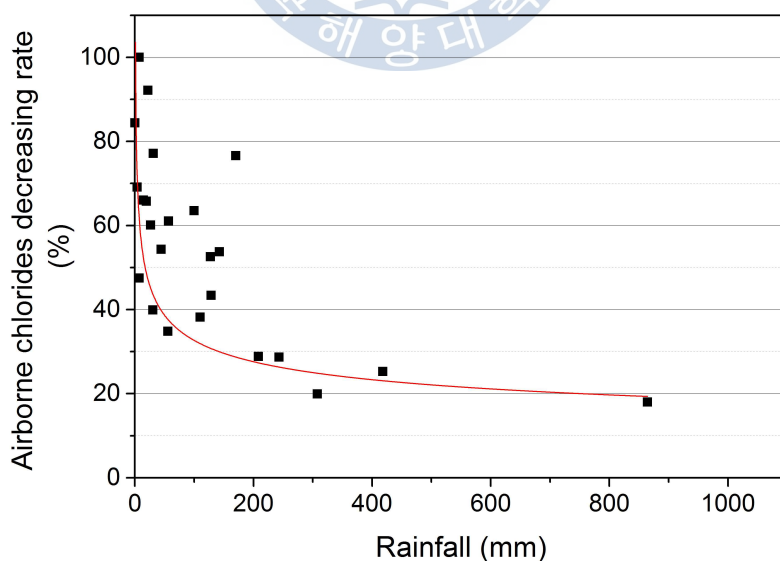


(b) Point E(인천)

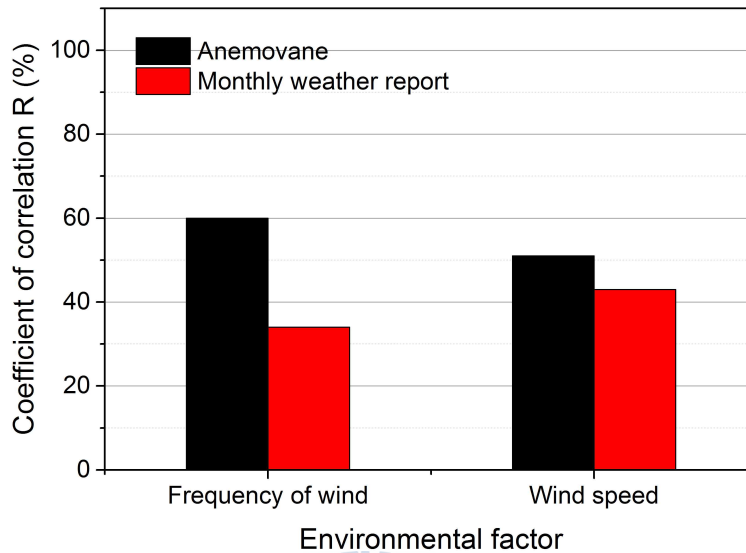
[그림 3-19] 월별 강우량과 비래염분(기상월보 사용)

[그림 3-20]은 기상월보에 기록된 월별 강우량과 측정된 월별 비래염분량을 비교하여 강우량에 따른 비래염분의 감소율을 나타낸 것이다. 전반적으로 $y=a^x$ 지수함수의 형태로 강우량에 따라 비래염분량이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 강우량과 비래염분량의 상관관계는 음의 상관관계로서 -63%이다. 강우량이 약 900mm 발생 시 대기 중의 비래염분량은 강우가 발생하지 않을 시에 비해 약 80%의 감소가 발생하는 것으로 예측된다.

[그림 3-21]은 풍향풍속계를 통해 관측한 기상데이터(풍향별 바람의 발생빈도, 풍속)와 측정된 비래염분량, 기상월보에 기록된 기상데이터와 측정된 비래염분량에 대해서 서로의 상관관계를 정리한 것이다. 기상월보의 데이터와 측정된 비래염분량의 상관성은 35~45%인 반면, 다방향 포집기와 풍향풍속계를 동일한 위치에 설치하여 측정한 비래염분량과 기상데이터의 상관성은 약 50~60%이다. 이는 기상데이터를 관측하는 위치와 비래염분을 포집하는 위치가 일치되어 상호간의 상관성이 다소 높아진 것으로 판단된다.



[그림 3-20] 강우량과 비래염분의 상관성(기상월보 사용)



[그림 3-21] 실험조건(실환경, 기상월보)별 바람의 발생빈도 및 풍속과 비래염분의 상관성

앞서 기술한 데이터들의 상관성을 정리한 결과, 전송시점 비래염분의 정량화를 위해서는 풍향풍속계를 이용하여, 0~3m/s(저속 풍속범위)내에서 발생하는 바람의 발생빈도와 풍속을 정량화에 반영하는 것이 보다 명확한 값을 도출하기 위한 필요조건인 것으로 사료된다.

3.3.4 바람의 발생빈도와 풍속에 따른 비래염분 정량화

[3.3.3 기상조건과 비래염분의 상관성]에서 도출된 실험조건별 상관성에 따르면, 풍향풍속계를 다방향 포집기와 동일한 위치에 설치하는 것이 관측되는 기상조건과 측정되는 비래염분량의 상호 상관성을 높이는 방법인 것으로 확인되었다. 따라서 풍향풍속계를 통해 관측된 기상데이터와 8방향 포집기에 포집된 비래염분량을 토대로 정량분석을 실시하였다. 바람의 발생빈도와 풍속은 실제 환경에서는 동시에 발생하는 자연현상으로 이들 두 개의 변수와 측정된 비래염분량을 비교하는 것은 다중회귀(multiple regression) 분석으로 적용하였다. 즉, 어떠한 독립변수(바람의 발생빈도,

[표 3-9] 다중회귀 분석 통계량 요약

R	R ²	추정값의 표준오차
0.9480	0.8988	0.1924

[표 3-10] 다중회귀 분석 계수

모형	비표준화 계수		표준화계수	t	유의확률
	B	표준오차	베타		
상수	-.395	.064		-6.178	.000
발생빈도	.022	.001	.795	15.201	.000
풍속	.447	.045	.525	10.035	.000

풍속)가 종속변수(비래염분량)에 영향을 미치는가를 파악할 수 있게 해주고, 각각의 독립변수가 종속변수에 얼마만큼의 영향을 미치는지를 가늠할 수 있게 해주기 때문이다. [표 3-9]와 [표 3-10]은 다중회귀 분석을 통해 도출된 계수를 나타낸 것이다. [표 3-9]에 의하면 바람의 발생빈도, 풍속 두 개의 독립변수들이 투입된 결과 결정계수(R²)은 0.8988로서 종속변수(비래염분량)를 89%를 설명하고 있음을 알 수 있다. 본 분석결과 다중회귀 식은 [표 3-10]의 비표준화 계수(B)들에 의해 다음과 같은 식(3-4)로서 표현된다. 즉, 비래염분량 변화에 영향을 주는 요인으로는 평균풍속이 바람의 발생빈도에 비해 약 20배 정도 영향력이 큰 것으로 분석된다.

$$C_a = -0.395 + 0.022m + 0.447n \quad (3-4)$$

C_a : 비래염분량 (mg/dm²/day)

m : 바람의 발생빈도 (저속 풍속범위 0~3m/s)

n : 10일 평균풍속 (m/s)

3.4 소결

본 3장에서는 개발된 다방향(8방향) 포집기를 실제 해안지역에 설치하여 대기 중 비래염분의 분포특성을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

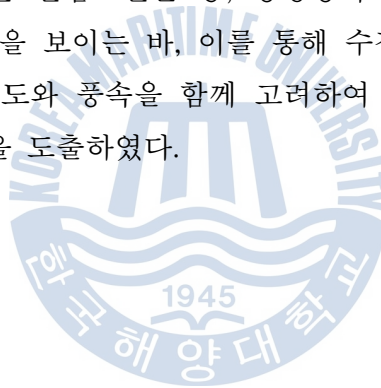
- 1) 계절별 비래염분의 분포에서 1년 평균 비래염분량에 비해 봄철(3월~5월)은 1.18배, 여름철(6월~8월)은 0.49배, 가을철(9월~11월)은 0.91배, 겨울철(12월~2월)은 1.42배 더 많은 비래염분량이 분포하는 것을 확인하였다.
- 2) 방향별 비래염분의 분포에서, 유효 3방향 평균은 전체 8방향 평균의 1.2배, 비유효 3방향 평균은 8방향 평균의 0.8배, 유효 3방향 평균은 비유효 3방향 평균의 1.5배의 관계가 있는 것으로 확인하였다.
- 3) 거리별, 높이별 비래염분의 분포는 기존의 연구들과 유사한 경향을 나타내고 있으나, 전반적으로 1방향 포집과 8방향 포집의 방식 차이로 인해 기존 연구들의 비래염분량에 비해 다소 높은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 전송시점 비래염분의 정량변화에 미치는 영향인자들의 분석을 통해 비래염분의 전달과정을 예측하였다. 바람의 발생빈도, 풍속, 강우에 의해 비래염분량은 변화되며, 이를 실환경에서의 실측 조사를 바탕으로 요소분석(element analysis)을 실시, 검증하였다. 이후, 실험조건별로 관측된 기상데이터와 측정된 비래염분량 사이의 상관분석을 실시, 높은 상관성을 가지는 실험조건을 비래염분 정량화에 활용하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 바람의 발생빈도와 비래염분량의 상관성은 실험조건별로 차이가 발생하지만 전반적으로 바람의 발생빈도가 증가할수록 비래염분량 또한 증가하는 것으로 확인하였다.
- 2) 풍속과 비래염분량의 상관성은 실험조건별로 차이가 있지만 전반적

으로 풍속이 증가할수록 비래염분량 또한 증가하는 것으로 확인하였다.

- 3) 기상월보의 데이터와 관측된 비래염분량 사이의 상관분석을 통해 비래염분량 추정 가능성을 검토하였으나 상관성이 매우 낮은 것으로 나타나 기상월보의 자료를 바탕으로 정량화는 어려울 것으로 사료된다.
- 4) 기상월보의 월 강우량에 따른 대기 중의 비래염분량에 대해서는, 일반적으로 강우량이 많을수록 측정되는 비래염분량이 지수함수의 형태로 감소되는 경향을 확인하였다.
- 5) 실환경에서 실시한 실험조건들 중, 풍향풍속계를 적용한 실험조건이 가장 높은 상관성을 보이는 바, 이를 통해 수집된 데이터들을 바탕으로 바람의 발생빈도와 풍속을 함께 고려하여 비래염분량을 추정하는 다중회귀 정량식을 도출하였다.



제 4 장 대기 중 비래염분량과 건축마감재별 부착 비래염분량의 관계

4.1 개론

[3장 해안지역 대기 중의 비래염분 정량화]에서는 다방향 포집기를 이용하여 실제 해안지역 5개 지점의 비래염분을 측정, 이를 통해 거리, 높이, 바람의 발생빈도, 풍속에 따른 정량화를 시도하였다. 하지만 정량화를 통해 도출된 값은 대기 중의 비래염분량을 나타내는 지표로서만 사용되는 것으로, 실제 구조물의 표면에 부착되는 비래염분량과는 다소 차이가 있다. 이와 관련한 연구사례들을 앞서 1장에서의 국내외 연구동향을 통해 소개하였다.

지금까지 부착 비래염분량(표면염화물량)에 관련한 선행 연구들을 정리한 결과, 대부분 콘크리트의 표면염화물량을 산정하는데 초점이 맞춰져 있다. 하지만 건축재는 콘크리트만으로 국한되는 것이 아니라 강재도 있으며, 마감재 또한 다양하다. 특히, 철근콘크리트 및 강 구조물에 있어서 기본적인 부식 방지대책으로는 도료를 이용하여 마감하는 방식이 일반적이지만 도료를 덧칠하는 횟수와 도료의 종류 등 마감재가 다양한 관계로 이 또한 비래염분의 부착정도를 확인할 필요가 있다. 또한 구조물 표면으로 비래염분을 포함한 해풍의 유입각도 및 강우에 의한 세정작용 등, 다양한 외부 환경조건들로 인해, 대기 중 비래염분량에 비해 실제 구조물 표면에 부착되는 양이 달라지는 것을 기존 연구사례들에서 확인하였다. 구조물 내염설계를 위한 수치해석을 활용하기 위해서는 경계조건이 되는 표면염화물량 산정이 중요하나 실제 부착되는 비래염분량이 다양한 조건

에 따라 변화되므로 정량적인 값을 산정하는데 어려움을 겪고 있다. 따라서 본 4장에서는 마감재를 도포한 철근콘크리트 및 강재의 내염해성 평가를 위해 부착 비래염분량을 변화시키는 요소들을 대상으로 촉진 비래염분 부착시험을 실시, 모르타르, 강재, 타일의 건축마감재별로 비래염분의 부착특성(부착율, 유실율)을 평가하였다.

4.2 실험 개요 및 방법

[표 4-1]은 실험인자 및 조건을 정리한 것이다. 건축마감재는 모르타르, 강재, 타일을 선정하였다. 기존의 연구사례를 검토하여, 건식거즈 포집기를 이용한 비래염분의 측정값을 대기 중의 비래염분량을 나타내는 지표로서 설정하였다. [그림 4-1]은 비래염분 포집기를 나타낸 것이며, 내부에 설치된 100mm×100mm 면적 크기의 건식거즈에 비래염분이 포집되는 원리를 가지고 있다. 모르타르는 표면 마감을 Smooth, Normal, Rough로 제작하였으며, 도포용 마감재로는 유성 및 수성 페인트를 선정하였다.

강재의 마감은 무도장, 우레탄도장, 불소도장, 광명단도장, 스테인리스로 5종을 선정하였으며, 타일의 경우 무유타일, 시유타일, 연마타일의 3종류로 구분하여 실험에 사용하였다. 무유타일(Unglazed Tile)은 유약을 입히지 않고 표면을 소성 소지 그대로를 유지한 타일이며, 시유타일(Glazed Tile)은 초별구이(1차 소성)후 유약을 입힌 뒤, 재별구이(2차 소성)을 하여 제품의 표면에 광택을 높인 타일이며, 연마타일(Polished Tile)은 자기타일의 표면을 연마기(숫돌)로 연마하여 천연광택을 내게 한 타일이다.

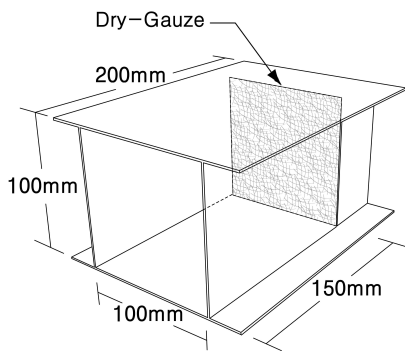
각 시편은 100mm×150mm의 크기로 제작하였으나 비래염분의 부착 부분은 100mm×100mm로 하였다. 제작된 시편들은 촉진 비래염분 시뮬레이터에 설치, 가동 시간에 따라 부착되는 비래염분을 정량적으로 조절하였다.

각 건축마감재별로 부착된 비래염분을 채취하는 전처리는 다음과 같이 진행하였다. 모르타르 표면에 부착된 비래염분은 ASTM C 1152에 준하여

[표 4-1] 실험인자 및 실험조건

재료 및 마감재		기호	촉진 비래염분 시물레이터 조건					표면 거칠기 (μm)	비래염분 부착시험		비래염분 유실시험		
			염수 농도 (%)	평균 풍속 (m/s)	온도 ($^{\circ}\text{C}$)	상대 습도 (%)	거치 시간 (h)		마감재	입사각 (0, 30, 45, 90)	강우 강도($\text{g}/\text{dm}^2/\text{hr}$)		
											0.1~2.0	2.1~4.0	4.1~6.0
건식거즈		G	3.5	1.5	22	40	120	—	○	○	×	×	×
Mortar	Smooth면	M-S						3.18	○	○	○	○	○
	Normal면	M-N						5.33	○	×	×	×	×
	Rough면	M-R						13.51	○	×	○	○	○
	S-유성	M-S-O						7.66	○	×	○	○	○
	S-수성	M-S-W						7.35	○	×	×	×	×
Steel	무도장	S-N						0.95	○	○	○	○	○
	우레탄	S-U						4.82	○	×	○	○	○
	광명단	S-R						3.84	○	×	○	○	○
	불소	S-F						2.49	○	×	×	×	×
	스테인리스	S-S						0.90	○	×	×	×	×
Tile	무유타일	T-U						3.35	○	○	○	○	○
	시유타일	T-G						2.62	○	×	○	○	○
	연마타일	T-P						3.14	○	×	○	○	○

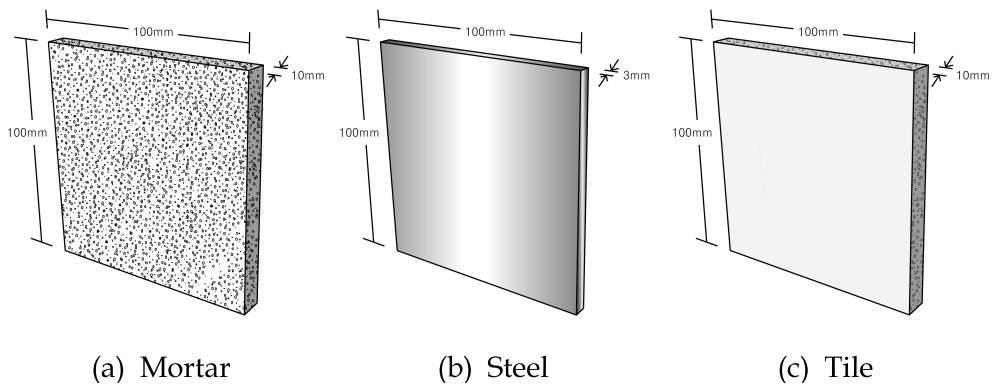
※ $1\text{dm}^2=100\text{cm}^2$



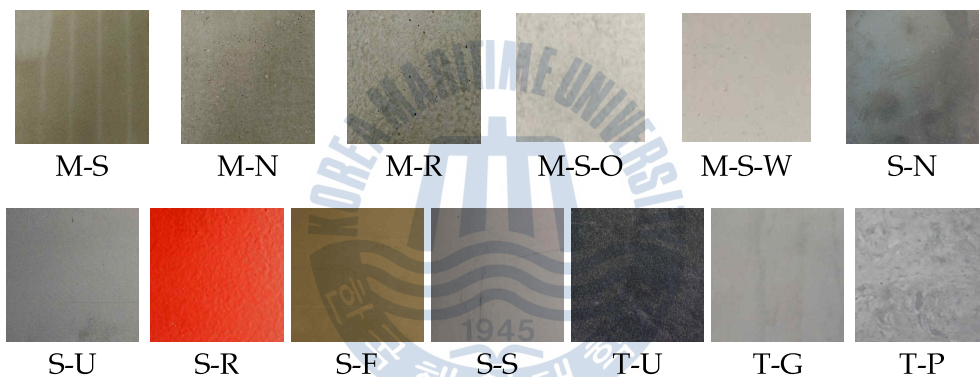
[그림 4-1] 건식거즈(G)가 적용된 비래염분 포집기

가용성염분량을 분석하였다. 강재의 경우, 부착된 비래염분을 증류수로 세정하여 세정된 용액의 농도를 분석하였다. 타일의 경우, 강재의 전처리 방식과 동일하게 진행하였다. 전처리가 완료된 시료용액들은 염화물이온의 정량화를 위해 선택성 전극을 이용한 전위차 적정법으로 분석하였다. 염화물이온 선택성 전극은 질산은 용액의 적정으로 시료용액 내의 염화물 이온의 농도감소에 따른 전위의 변화를 감지한다.

실험에 사용된 각 시편들은 3개를 평균으로 하여 분석하는 것을 기본으로 진행하였다. [그림 4-2]는 시편의 도식 및 규격을, [그림 4-3]은 건축마감재별 시편의 사진을 나타낸 것이다. [표 4-2]는 실험에 사용된 모르타르의 배합을 나타낸 것이다.



[그림 4-2] 재료별 시편의 도식 및 규격



[그림 4-3] 시편의 종류

[표 4-2] 모르타르 시편의 배합

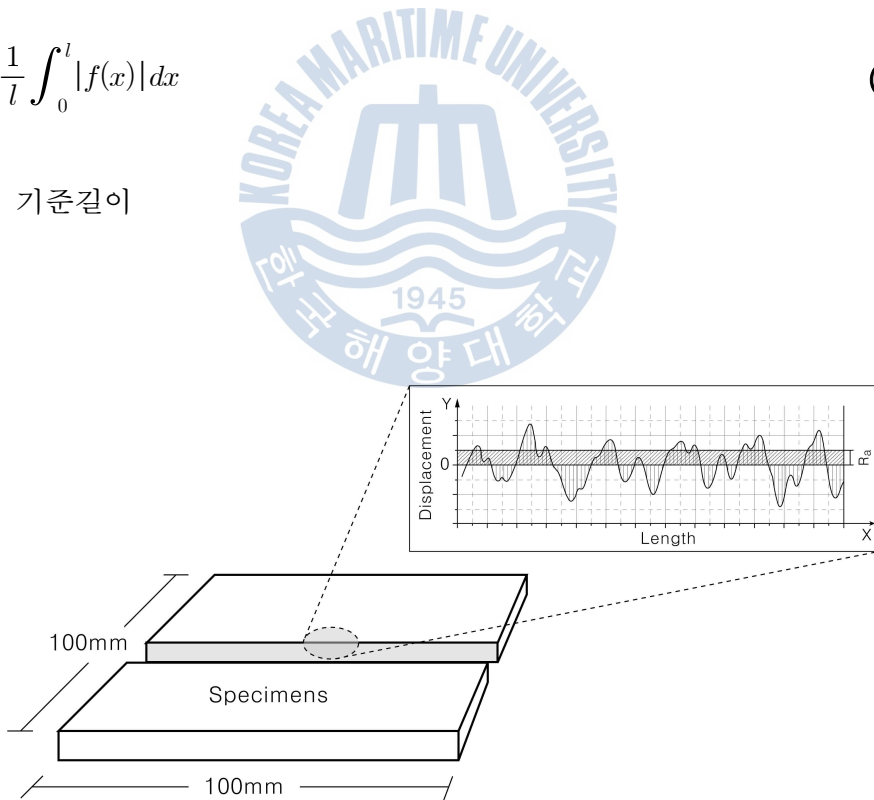
W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)
50	622.3	311.2	1275.7

4.2.1 건축마감재별 비래염분의 부착

[그림 4-4]는 실험에 사용된 시편의 도식에서 산술평균 거칠기(R_a)를 측정하는 원리를 나타낸 것이다. 산술평균 거칠기(R_a)는 거칠기 곡선으로부터 그 평균 선의 방향에 기준길이(l)을 설정하여, 그 표본 부분의 평균 선 방향을 x 축으로, 세로 배율 방향을 y 축으로 하여 거칠기 곡선을 $y=f(x)$ 로 나타낸 것이다. $y=f(x)$ 를 식(4-1)에 대입하여 도출된 값을 마이크로미터(μm) 단위로 나타낸 것을 산술평균 거칠기로 하였다. 측정은 Optical Profiler의 비접촉식 광학 현미경(NV-E1000) 분석을 통해 진행하였다. 스캔 범위는 길이 $10000\mu\text{m} \times$ 폭 $500\mu\text{m}$ 이다.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (4-1)$$

l : 기준길이

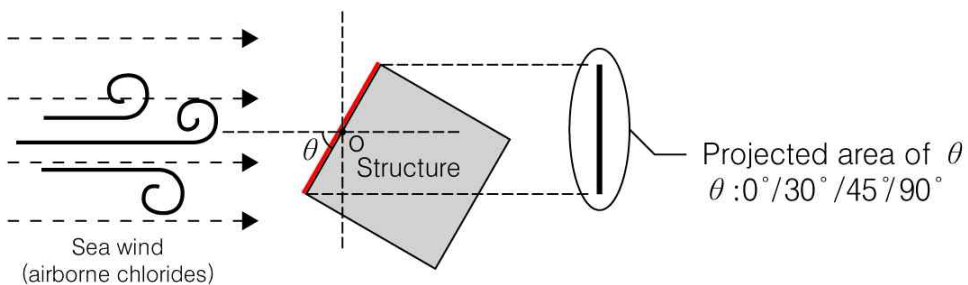


[그림 4-4] 산술평균 거칠기(R_a) 도출의 예시

실제 환경에서는 불규칙적인 기상조건으로 인하여 건축마감재별 비래염분 부착시험에 어려움이 있다. 이에 불규칙적인 기상조건을 제어함과 동시에 일정한 비래염분을 발생시킬 수 있는 실험장치의 필요성이 대두되어, 본 연구의 2장에서 개발된 비래염분 시뮬레이터를 사용하여 축진 부착시험을 진행하였다. 본 실험에서는 시뮬레이터를 실내에 설치하여 온도 22℃, 습도 40%로 일정하게 유지하였다. 시뮬레이터의 가동시간에 따라 일정한 양의 비래염분을 시편에 부착시키기 위해서는 예비실험이 필요하였다. 시편거치대와 저수조의 간격을 3m로 급기팬과의 간격을 5m로 조절하였으며, 시편거치대 위치에서의 유입 풍속을 1.0~1.5m/s로 유지한 결과, (3, 2)와 (3, 3)의 두 위치(그림 2-9 참조)에서 $\pm 5\%$ 의 오차 범위 내의 8.20, 8.18mg/dm²/day 비래염분이 부착되는 것을 확인하였다. 따라서 두 위치에서만 시편을 설치하여 부착시험을 진행하는 것으로 결정하였다.

4.2.2 바람의 입사각에 의한 비래염분의 부착

[그림 4-5]는 바람의 입사각에 따라 부착량을 평가하기 위한 실험방법의 도식이다. [그림 4-5]에 나타난 바와 같이 축진 비래염분 시뮬레이터 내 시편거치대의 각도를 기준점에 따라 조정하였다. 입사각은 0°, 30°, 45°, 90° 으로 설정하였다.



[그림 4-5] 구조물 배치에 따른 입사각 변화

4.2.3 강우에 의한 비래염분의 유실

[그림 4-6]은 강우의 세정작용에 따른 비래염분의 유실율을 평가하기 위해 사용된 강우재현 장치(살수장치)이다. 건축마감재별로 정량의 비래염분을 부착시킨 후, 강우재현 장치에 거치하여 일정한 시간당 강우를 발생시켰다. 장치의 내부 온도는 20℃로 유지하였으며, 강우량은 0.1~2.0, 2.1~4.0, 4.1~6.0g/dm²/hr로 3가지의 범위로 설정하였다.



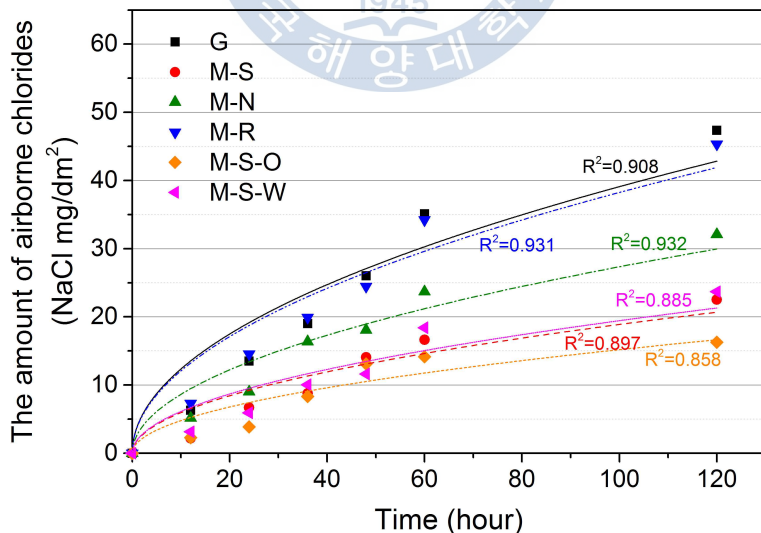
[그림 4-6] 강우재현 장치(살수장치)

4.3 실험 결과 및 분석

4.3.1 건축마감재별 부착율

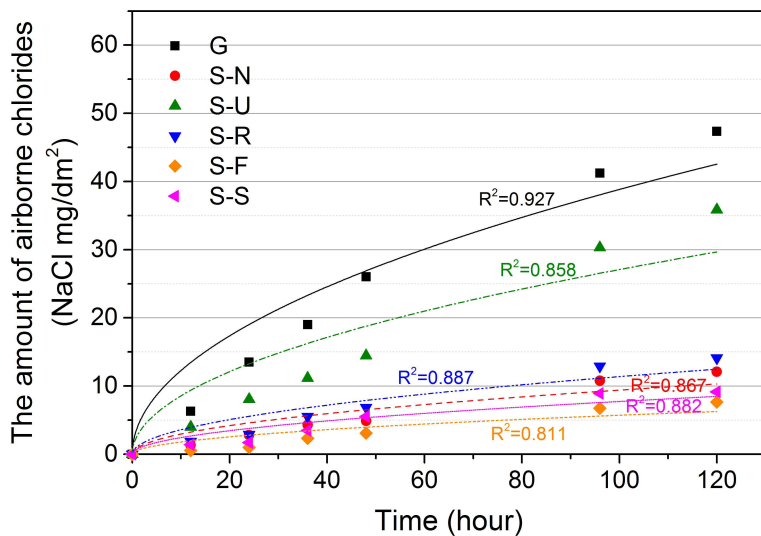
[그림 4-7]은 건축마감재별로 부착된 비래염분량을 나타낸 것이다. 투과형 재료인 건식거즈(G)가 가장 높은 부착량을 나타내어 건식거즈를 이용한 측정값을 대기 중 비래염분량의 지표로서 사용해도 무관할 것으로 사료된다.

모르타르(M-S, M-N, M-R)의 경우, M-R이 가장 높은 부착량을 가지는 것으로 확인하였다. 페인트 도포를 실시한 M-S-O, M-S-W의 경우, 수성 페인트 마감인 유성 페인트에 비해 부착량이 높은 것을 확인하였으며, 무도포 M-S와 수성페인트 도포 M-S-W는 거의 유사한 부착량을 가지는 것으로 나타났다. 유성 페인트 마감을 실시한 M-S-O가 가장 낮은 부착량이 측정되어 방식을 위한 최적의 마감공법으로 사료된다. 모르타르의 분석결과, 전반적으로 도포를 실시한 마감이 낮은 부착량을 가지는 것으로 나타

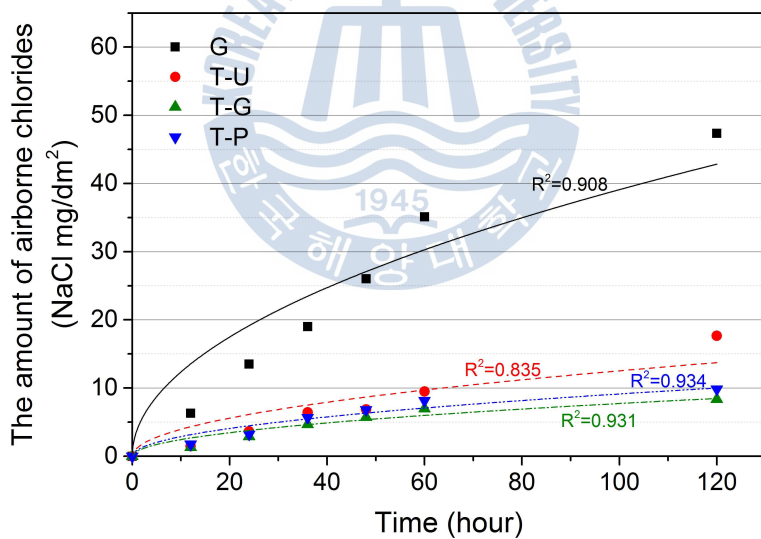


(a) Mortar specimen

[그림 4-7] 건축마감재별 부착 비래염분량 (계속)



(b) Steel specimen



(c) Tile specimen

[그림 4-7] 건축 마감재별 부착 비레염분량

나 부식 방지를 위해선 도포 마감이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

강재의 경우, 시간의 경과에 따라 부착되는 비레염분량이 우레탄도장

(S-U), 광명탄도장(S-R), 불소도장(S-F)의 순으로 높은 것을 확인하였다. 그 중 우레탄도장(S-U)이 타 마감에 비해 상대적으로 높은 부착량을 가지는 것으로 나타났으며 무도장 강재(S-N)와 스테인리스(S-S)는 거의 유사한 부착량을 가지는 것으로 나타나 재료적인 차이와 관련한 영향은 없는 것으로 생각된다. 불소도장(S-F)은 가장 낮은 부착량을 보여 부식을 방지하는데 매우 유리할 것으로 판단된다.

타일의 경우, 무유타일(T-U)이 시유(T-G) 및 연마(T-P)타일에 비해 다소 높은 부착량을 나타내었다. 이 같은 결과는 무유타일(T-U)의 경우, 표면의 유약처리 및 연마 등을 하지 않아 표면이 다소 거칠어 높은 부착량을 가지는 것으로 생각된다. 반면 시유(T-G) 및 연마(T-P)타일은 인공광택 및 천연광택을 내기 위해 각각 유약처리와 숏돌 연마를 실시한 것으로 표면의 거칠기가 매끄러운 상태를 유지하였기 때문에 낮은 부착량이 측정된 것으로 생각된다. 시유(T-G) 및 연마(T-P)타일은 부착량이 거의 유사한 것으로 확인하였다. 각 건축마감재별로 부착되는 비래염분량에 대해 비선형 회귀분석을 실시한 결과, 식(4-2)와 같은 함수가 도출되었다. 식의 형태로 보아 시간경과에 부착량은 지속적으로 증가하지만 그 증가폭이 점차 낮아지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 시편 표면이 비래염분 부착용량의 한계를 초과하여 더 이상 부착되지 않고 점차 회피되어진 것으로 사료된다.

$$C_A = A_c \sqrt{t} \quad (4-2)$$

C_A : 비래염분 부착량 (mg/dm²)

A_c : 건축마감재별 부착계수

t : 시간 (hour)

[표 4-3]은 비선형 회귀분석으로 도출된 각각의 건축마감재별 부착계수

[표 4-3] 건축마감재별 부착계수

A_c	G	M-S	M-N	M-R	M-S-O	M-S-W	S-N
	3.91	1.88	2.73	3.82	1.51	1.94	0.94
	S-U	S-R	S-F	S-S	T-U	T-G	T-P
	2.70	1.13	0.57	0.77	1.25	0.77	0.91

(A_c)를 정리한 것이다. 부착계수에 따르면 건축마감재별 부착량의 차이는 모르타르가 가장 높은 부착량을 보이고 있으며, 강재와 타일은 상대적으로 낮은 부착량을 나타내고 있다. 모르타르, 강재, 타일을 비교한 결과, 가장 적은 부착량을 보인 강재에 비해 모르타르가 약 3.3배 이상 높은 것으로 나타났다.

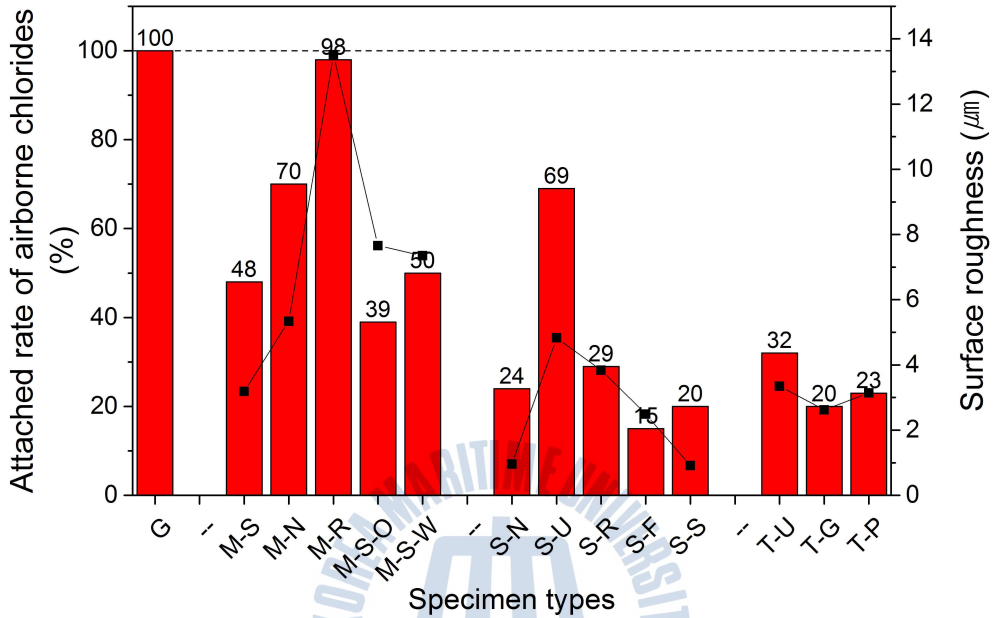
각 건축마감재별로 비래염분의 부착을 실시한 결과, 모든 재료가 상이한 부착량이 측정되었으며 이는 건축마감재별로 표면 거칠기의 차이에 인한 것으로 추정된다. 이를 증명하기 위해 표면 거칠기와 비래염분 부착율(건식거즈의 부착계수를 100% 기준으로 하여 건축마감재별 부착계수를 백분율로 나타낸 것)의 상관성을 분석하였다. [그림 4-8]은 건축마감재별 표면 거칠기와 비래염분 부착율을 나타낸 그래프이다. 전반적으로 표면 거칠기가 높을수록 부착율이 증가하는 경향을 확인 할 수 있다.

[그림 4-9]는 앞서 기술한 표면 거칠기에 따른 부착율의 상관성을 증명하기 위해 분석을 실시한 그래프이다. 분석결과에 의하면 상관계수 94%, 결정계수 87%로 매우 높은 상관성이 도출되어 향후, 표면 거칠기 측정을 통해 부착되는 비래염분량을 예측할 수 있을 것으로 생각된다. 식(4-3)은 표면 거칠기와 비래염분 부착율의 관계식을 나타낸 것이다.

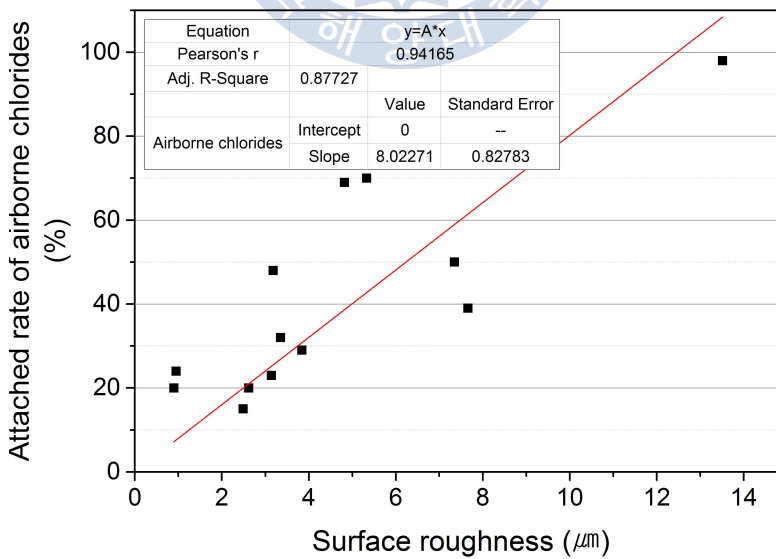
$$C_{ar} = 8.02 \times R_a \quad (4-3)$$

C_{ar} : 비래염분 부착율 (%)

R_a : 산술평균 표면 거칠기 (μm)



[그림 4-8] 건축마감재별 비래염분의 부착율과 표면 거칠기



[그림 4-9] 표면 거칠기와 비래염분 부착율의 관계

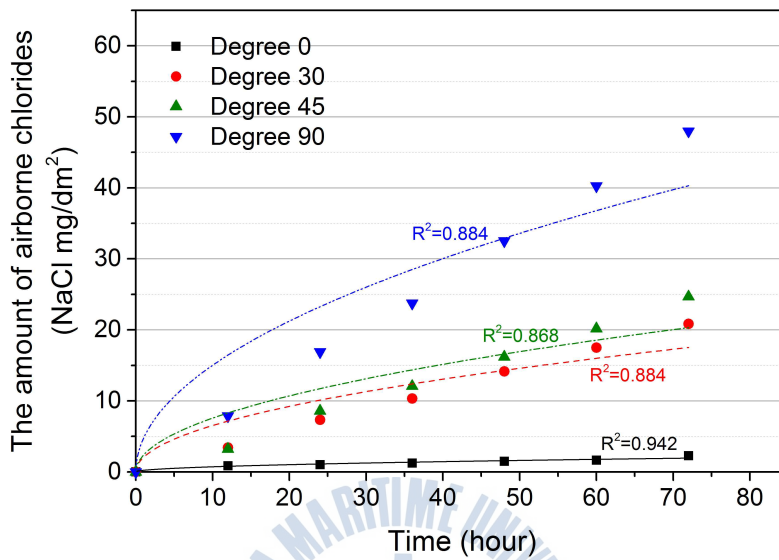
본 연구에서는 건식거즈를 통해 비래염분을 포집한 값을 대기 중 비래염분량을 나타내는 지표로서 평가하였다. 즉, 건식거즈를 통해 포집한 대기 중 비래염분량을 100%로 가정하면, 각 건축마감재별 부착되는 비래염분량을 산정할 수 있다. 재료의 종류 및 마감방식마다 차이는 있지만 대략적으로 모르타르는 대기 중 비래염분량에 비해 약 60%, 강재는 30%, 타일은 25%가 부착되는 것으로 추정된다.

4.3.2 입사각에 따른 부착율

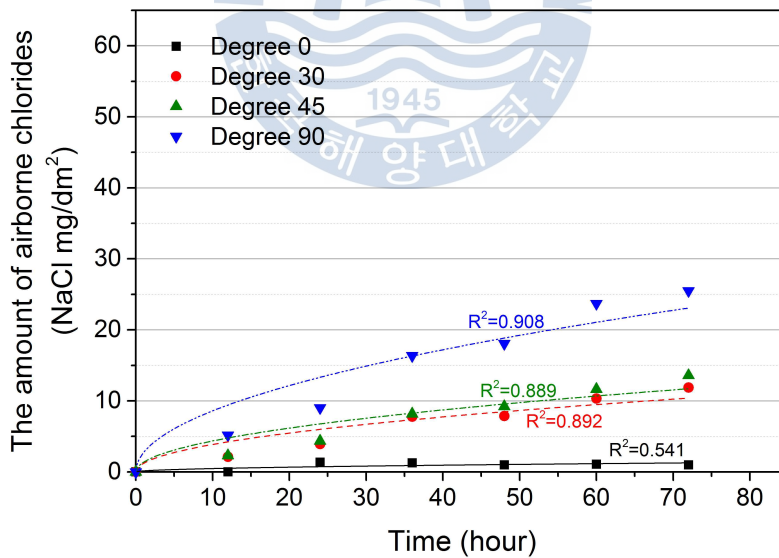
[그림 4-10]은 바람의 입사각에 따라 부착되는 비래염분량을 나타낸 것이다. 이 또한 시간의 경과에 따라 부착량의 증가폭(기울기)이 점차 낮아지는 형태를 취하고 있으며 이에 대한 이유는 부착용량의 한계로서 앞에서 설명하였다. 분석 결과, 건축마감재별로 입사각에 따라 부착량의 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 한편 모든 건축마감재에서 입사각 0° 의 부착량이 측정되었으나 부착율이 10%미만인 관계로 의미가 없는 것으로 간주하였다. 입사각 30° 과 45° 에서 부착되는 비래염분량은 45° 가 다소 높은 것으로 확인하였다.

[그림 4-11]은 입사각에 따른 부착율을 나타낸 그래프이다. 시편 M-S, S-N, T-U를 선택하여 입사각에 따른 부착율을 검토하였다.

모르타르가 타 재료들에 비해 다소 높은 부착율을 보이고 있으며, 강재와 타일의 비교에서는 강재가 부착율이 다소 높은 것을 확인하였다. 아울러, 모든 시편에서 입사각이 커질수록 부착율이 증가하는 것을 확인하였다. 즉, 재료마다의 차이는 있지만 입사각이 90° 인 경우 30° 에 비해 약 2~3배의 비래염분이 부착되는 것을 확인하였다. 이는 [그림 4-5]에 나타난 것처럼 바람의 입사각에 따라 투영면적의 크기가 달라지는 관계로 부착량의 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 이는 해안지역 구조물의 표면 염화물량 산정을 위해서는 그 지역에서 주로 발생하는 풍향에 대한 검토가 반드시 필요할 것으로 사료된다.

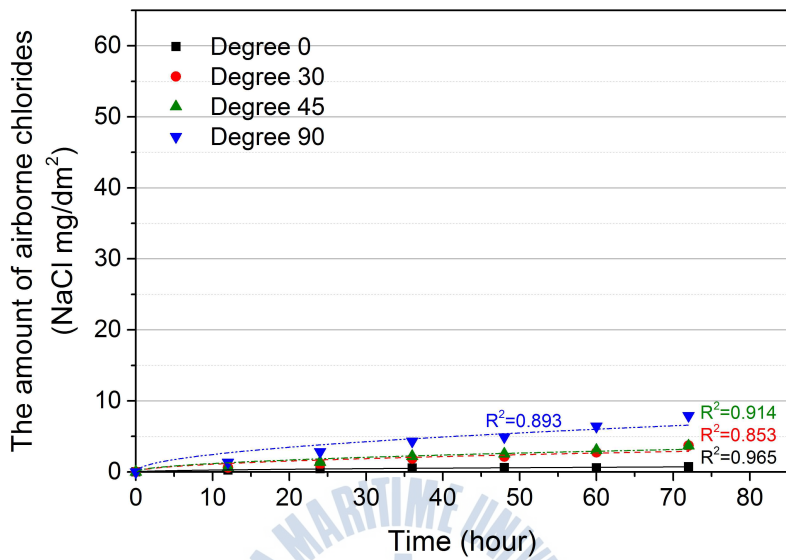


(a) Gauze

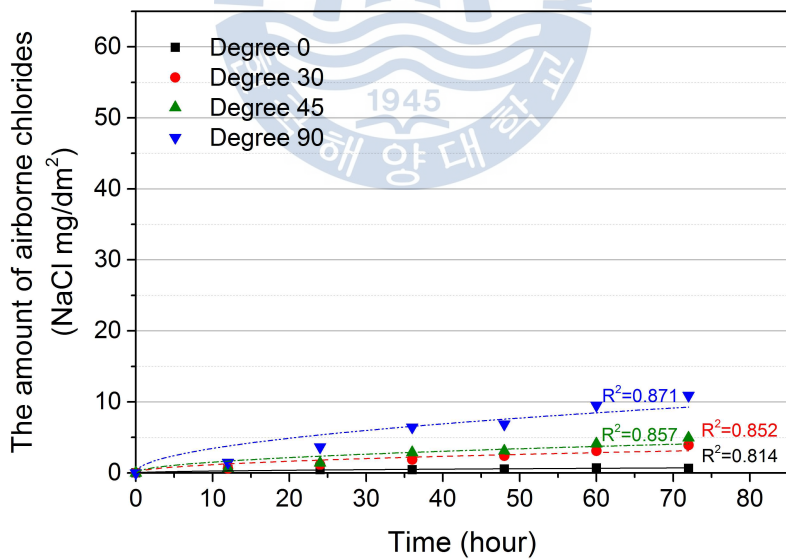


(b) Mortar specimen

[그림 4-10] 입사각 변화에 따른 부착 비래염분량 변화 (계속)

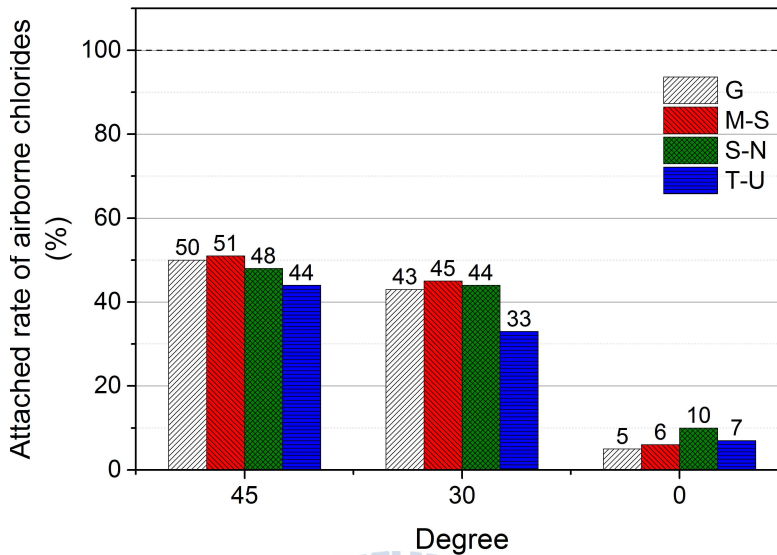


(c) Steel specimen



(d) Tile specimen

[그림 4-10] 입사각 변화에 따른 부착 비래염분량 변화



[그림 4-11] 입사각에 따른 비래염분의 부착율

4.3.3 세정작용에 의한 유실율

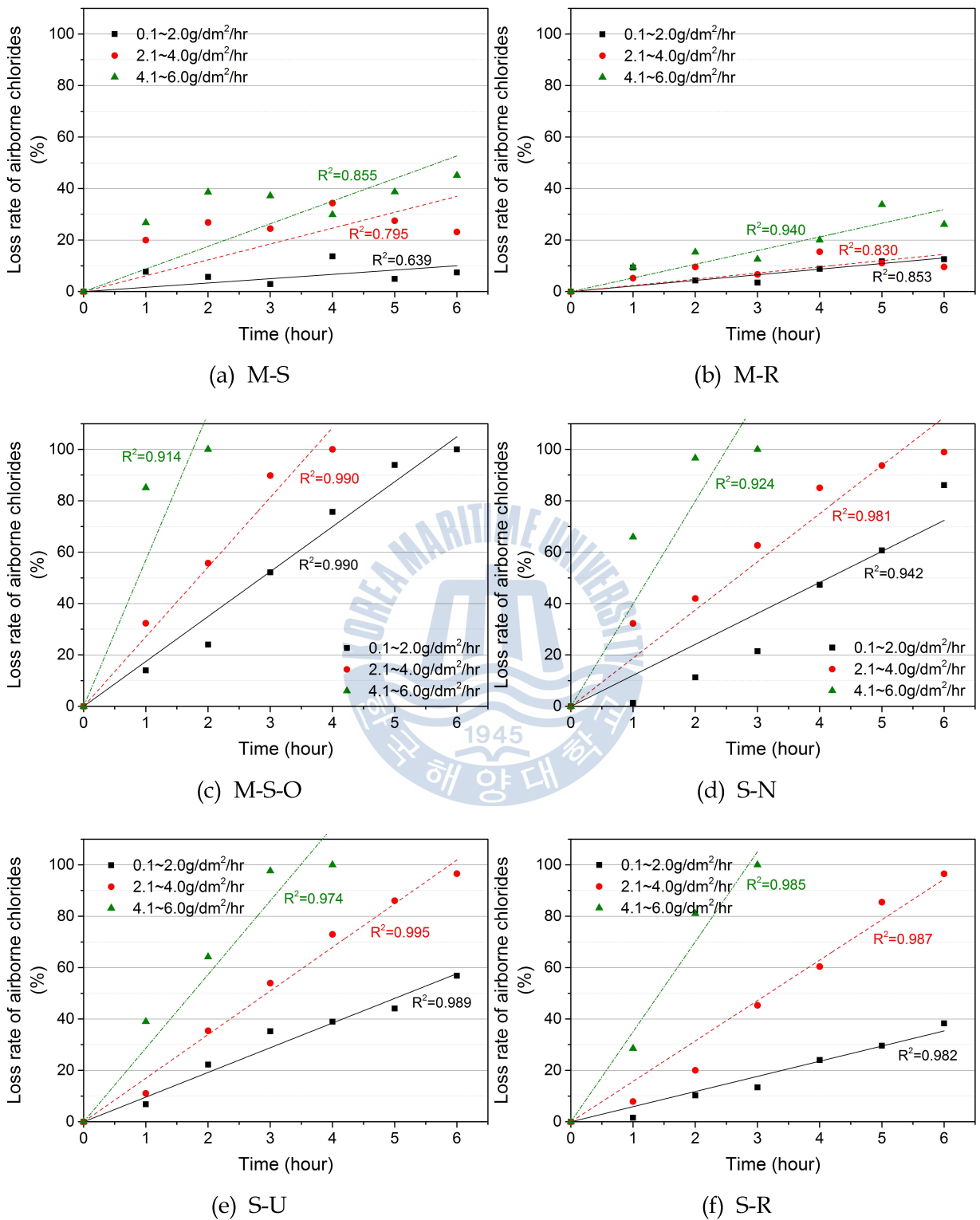
[그림 4-12]는 건축마감재별로 정량 부착된 비래염분이 강우에 의해 유실되는 정도를 나타낸 그래프이다. 시간의 경과에 따른 유실율을 식(4-4)의 형태로 나타낼 수 있으며, L_c 는 건축마감재별 유실되는 정도를 나타내는 유실계수이다.

$$C_{lr} = L_c \times t \quad (4-4)$$

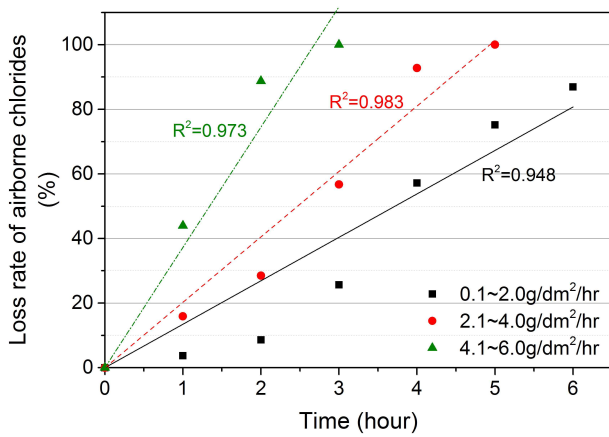
C_{lr} : 비래염분의 유실율 (%)

L_c : 유실계수

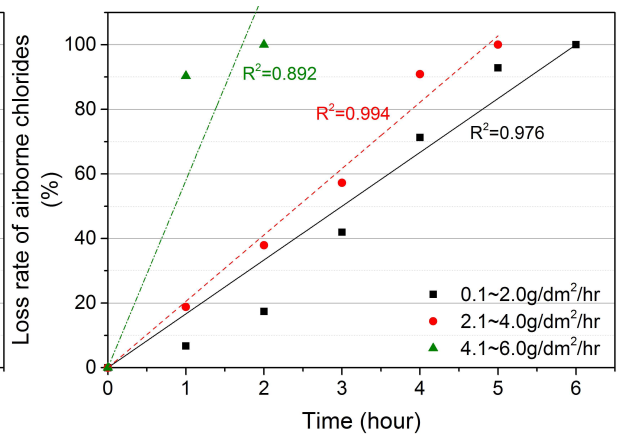
t : 시간 (hour)



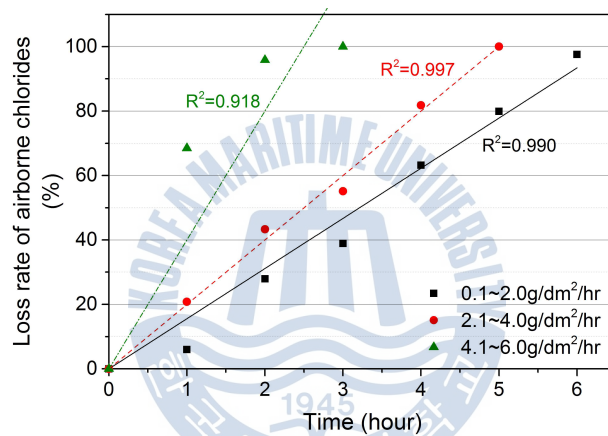
[그림 4-12] 강우(살수)에 의한 비래염분의 유실율 (계속)



(g) T-U

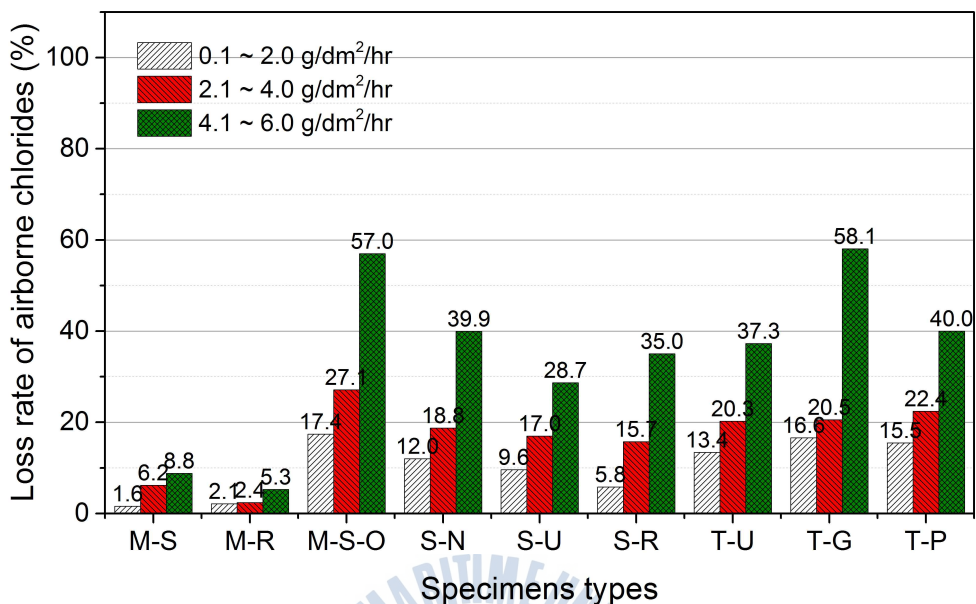


(h) T-G



(i) T-P

[그림 4-12] 강우(살수)에 의한 비래염분의 유실율



[그림 4-13] 건축마감재별 세정에 따른 비래염분의 유실계수

[그림 4-13]는 건축마감재별 유실계수를 나타낸 것이다. 건축마감재별로 정량의 부착 비래염분이 1시간당 세정되는 정도를 나타낸 것이다. 일반적으로 모든 시편에서 강우의 세기를 $0.1 \sim 2.0 \text{ g/dm}^2/\text{hr}$ 에서 $4.1 \sim 6.0 \text{ g/dm}^2/\text{hr}$ 으로 높일수록 유실계수가 약 3배 정도 높아지는 것을 확인하였다.

모르타르(M-S, M-R)는 타 시편들에 비해 유실계수가 낮은 것을 확인하였다. 반면, 유성페인트로 마감된 모르타르 시편(M-S-O)는 M-S와 M-R에 비해 상대적으로 높은 유실계수를 보여주고 있다. 이는 유성페인트의 마감이 모르타르 표면의 공극을 메워 용해된 비래염분의 침투를 차단함과 동시에 표면 거칠기를 낮추는 효과로 유실계수가 높아진 것으로 사료된다. 이를 통해 노출 콘크리트와 같이 마감을 하지 않는 구조물의 경우, 표면에 부착된 비래염분의 세정이 용이하지 않아 염해 발생 가능성이 더 높을 것으로 사료된다.

강재 시편의 경우, 무(無)마감 S-N이 S-U, S-R과 비교해 다소 높은 유실계수를 가지는 것으로 나타났다. 타일의 경우, 유약처리를 한 시유타일

(T-G)이 강우의 세기와 상관없이 무유, 연마타일에 비해 유실계수가 높은 것을 확인하였다. 무유타일은 다른 타일에 비해 유실계수가 다소 낮은 것으로 나타났다. 이는 유약을 입히지 않아 표면이 다공구조로 형성되어 있으며, 표면 거칠기 또한 높아 세정이 용이하지 않았던 것으로 판단된다. 연마타일은 유약처리를 하지 않는 점에서 무유타일과 비슷하다고 할 수 있다. 단지 광택처리를 위해 연마기로 연마한 점에서 표면 거칠기가 $3.14\mu\text{m}$ 로, $3.35\mu\text{m}$ 의 무유타일에 비해 낮은 점이 유실계수를 다소 높이는데 일조한 것으로 사료된다.

실험결과에 의하면, 건축마감재별로 비래염분 유실율이 상이한 것으로 확인한 바, 시간당 강우량 정보를 바탕으로 세정되는 정도를 예측한다면 구조물의 표면염화물량 산정에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

4.4 소결

본 4장에서는 건축구조물에 일반적으로 사용되는 건축재료 및 마감재 표면에 부착되는 비래염분의 특성을 실험을 통해 분석하였다. 아울러, 구조체 표면으로 입사되는 해풍의 각도에 따라 각 건축마감재별로 부착되는 비래염분량을 평가하였다. 또한 각각의 마감재별로 표면에 부착된 비래염분이 강우에 의해 유실되는 정도를 평가하였다. 실험결과는 다음과 같다.

- 1) 건식거즈를 통해 포집한 비래염분을 대기 중 비래염분량의 지표로 하여, 모르타르는 60%, 강재는 30%, 타일은 25%의 부착율을 가지는 것으로 확인하였다. 부착율의 차이는 재료의 종류 및 마감방식에 따라 달라지는 것으로 확인하였다.
- 2) 모르타르의 경우, 무(無)마감 시편이 유(有)마감에 비해 부착율이 높은 것으로 나타나 염해를 방지하기 위해서는 마감이 반드시 필요한 것으로 사료된다.
- 3) 건축마감재별 부착율의 차이는 표면 거칠기의 영향인 것으로 확인되었으며, 이를 상관분석을 통해 증명하였다.

- 4) 입사각에 따라 건축마감재별로 비래염분의 부착율이 달라지며, 입사각이 90° 인 경우 30° , 45° 에 비해 약 2.5~3.0배 증가하는 것을 확인하였다. 구조물의 내염설계 시 그 지역의 주풍향에 대한 검토가 반드시 필요한 것으로 사료된다.
- 5) 부착된 비래염분은 강우가 발생 시 세정작용에 의해 유실되며, 이에 각 건축마감재별 유실계수를 구하였다. 유실계수에 따른 유실율의 차이는 재료의 종류 및 마감방식에 따라 형성되는 표면 거칠기와 관련성이 높은 것으로 사료된다.

염해환경에 건설되는 구조물에 있어 내염설계의 적용은 반드시 필요한 사항이며, 내염설계에서 경계조건이 되는 표면염화물량의 산정은 필수적이다. 본 5장의 연구결과는 향후 구조물의 표면염화물량을 예측하는데 유용이 사용될 것으로 판단된다.



제 5 장 부착 비래염분량에 따른 강재마감별 부식 저항성 평가

5.1 개론

강재는 철근콘크리트 구조물의 보강철근으로 또한 강 구조물의 구조용 부재로 폭넓게 사용되고 있지만 염분 등의 열화인자와의 접촉으로 쉽게 부식되는 단점이 있다. 특히, 해풍과 함께 내륙으로 전달되는 비래염분은 지형 및 기후조건 등에 따라 그 분포 및 유동특성을 달리하여 정량적인 값을 도출하기가 어려우나 철근콘크리트 및 강 구조물의 표면에 부착될 경우, 종극적으로 강재부식을 유발한다. 강재부식은 구조물의 내구성을 저하시키는 부정적인 요인에 속하므로 이를 예방하기 위한 대책 마련이 반드시 필요하다.

철근콘크리트 구조물에서 비래염분에 의한 강재부식을 예방하기 위해서는 콘크리트에 적절한 피복두께를 확보함과 동시에 물질이동 저항성이 높은 배합을 적용하여 보강철근까지 염분의 도달을 지연시키는 것이다. 한편, 강 구조물의 경우에는 모재 자체를 방식성능이 확보되는 내후성 강재로 적용하는 것이다. 내후성 강재는 부식이 개시된 후에 생성된 표면 부식물이 비래염분과 같은 외부 열화인자의 침입을 차단하도록 되어 있어 공용기간 중의 부식정도가 유지관리상에 문제가 없도록 하는 메커니즘을 가진다.

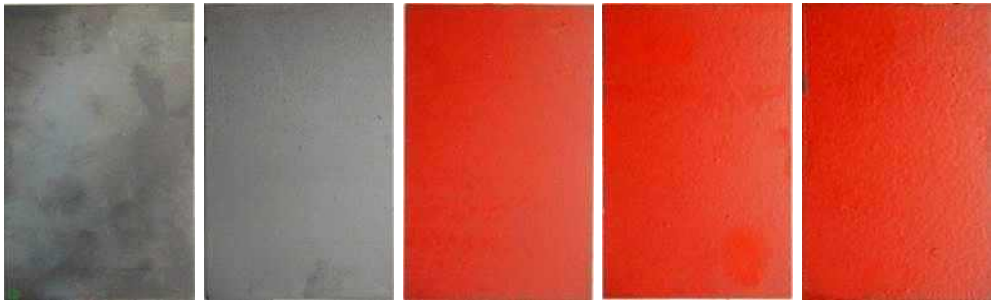
앞서 기술한 바와 같이 콘크리트와 강재의 자체적인 방식성능 개선과 더불어 철근콘크리트 및 강 구조물에서 동시에 적용되는 일반적인 방식기

법으로는 외부 열화인자의 1차적인 침투를 사전에 차단하기 위한 표면도장에 의한 도포마감이다. 하지만 부식을 방지할 목적으로 시공되는 표면마감재에 대해, 염화물의 침투 저항성 및 방식성능 평가에 관한 명확한 연구결과나 합리적인 판단기준이 없어 사용에 혼란을 초래하는 문제점이 있다. 철근콘크리트 구조물의 도장마감은 1차 마감재에 의한 염화물 차단, 2차 피복콘크리트에 의한 염화물 침투 지연으로 1, 2차의 복합적인 방식(차염)효과를 발휘하지만 강 구조물의 경우, 1차 마감재로만 구성되어 있어 콘크리트에 비해 상대적으로 부식이 발생될 가능성이 높다. 하지만 [1장 서론]의 국내외 연구동향에서 기술한 내용과 같이 철근콘크리트 구조물의 마감방식 연구에 비해 강 구조물에 관련한 연구는 상당히 부족한 실정이다. 이에 본 5장에서는 강재마감별로, 부착 비래염분량에 따른 부식 저항성을 규명하기 위해 촉진 비래염분 시뮬레이터를 이용, 실내 실험을 통해 정량화하고자 하였다. 한편, 염해 환경에서의 강재부식은 오랜 시간에 걸쳐 발생하는 현상이므로 장기적인 관점에서 마감재의 방식(차염)효과를 관찰하는 것이 매우 중요하다. 앞서 기술한 표면 마감재의 방식(차염)효과에 대한 실내 실험은 실제의 해양환경의 변화되는 상황을 정확히 반영하지 못하는 단점을 가지는 바, 각종 표면 마감재가 적용된 강재시편의 폭로를 통해 마감재의 수명과 방식(차염)효과에 대해 조사하였다. 촉진 부식시험과 폭로 부식시험의 병행을 통해 도출된 강재마감별 부식 저항성은 해양환경에 위치한 강 구조물의 내구성 확보와 유지관리를 위한 유용한 참고자료가 될 것으로 생각한다.

5.2 실험 개요 및 방법

5.2.1 시료의 선정

각 시편은 P사의 협조로 무도장, 우레탄도장, 광명1단, 광명2단, 광명3단, 스테인리스201, 304, 316, 430, 불소도장으로, 총 10종의 시편을 제작하였다. [그림 5-1]에 제작된 시편의 사진을 나타내었으며 일반적인 특징



(a) 무도장 (b) 우레탄 (c) 광명1단 (d) 광명2단 (e) 광명3단



(f) SUS 201 (g) SUS 304 (h) SUS 316 (i) SUS 430 (j) 불소도장

[그림 5-1] 각 마감방식의 강재 시편

은 아래와 같다.

(1) 무도장(No coating)

도료를 도포하지 않은 상태의 강재시편이다.

(2) 우레탄도장(Urethane coating)

우레탄 수지(樹脂) 클리어를 사용한 도장으로 외관의 품질이 뛰어나고 멜라민 수지를 포함하지 않기 때문에 내산성이 우수한 특징이 있다. 또한 우레탄 결합은 결합강도가 높기 때문에 내강도성이 우수하다.

(3) 광명단도장(Red lead coating)

Pb_3O_4 , PbO (산화연)을 구워서 만든 적색 안료(顔料)를 바른 것으로 착색제로서의 기능보다도 부식방지용 페인트의 안료로서 많이 사용된다.

[표 5-1] 스테인리스의 조성

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Austenite	201	0.15 이하	1.00 이하	5.5~ 7.5	0.06 이하	0.0 이하	3.5~ 5.5	16~18	—
	304	0.06 이하	1.00 이하	2.00 이하	0.045 이하	0.03 이하	8.0~ 10.0	18~20	—
	316	0.08 이하	1.00 이하	2.00 이하	0.045 이하	0.03 이하	10.0~ 14.0	16~18	2.0~ 3.0
Ferrite	430	0.12 이하	0.75 이하	1.00 이하	0.04 이하	0.03 이하	—	16~18	—

H_2S 에는 검게 변하지만 알칼리에는 강하다.

(4) 스테인리스(Stainless, SUS)

강재의 내식성 부족을 개선할 목적으로 만들어진 내식용 강재로 통상 철-크로뮴계의 페라이트 스테인리스강과 철-니켈-크로뮴계의 오스테나이트 스테인리스강으로 분류할 수 있다. [표 5-1]에 시편으로 사용된 스테인리스의 조성을 나타내었으며 오스테나이트 스테인리스강은 철의 900~1400℃에서 안정된 결정형인 면심입방 결정을 다량의 니켈과 크로뮴을 첨가함으로써 상온까지 안정되게 한 것이다. 페라이트 스테인리스강은 상온에서의 철의 결정계인 체심 입방결정 속에 많은 크로뮴을 녹여 넣어서 산화될 때 철과 크로뮴의 양쪽 산화막을 표면에 만들어 내부를 보호하도록 한 것이다.

(5) 불소도장(Fluorine coating)

불소도장은 초내후성 및 비오염성 도료이다. 시공과정은 상 도장 위에 공연(空研)을 한 후, 불소 수지계의 클리어를 도장한 것으로 통상 일반도장과 달리 광택과 발수성을 장기간 유지할 수 있다. 산성에 강하다는 특징이 있지만 재료비가 비싸다는 단점을 가지고 있다.

5.2.2 부식 시험

강재마감별 부식시험은 인공환경에서의 촉진 부식시험과 자연환경에서의 폭로 부식시험으로 나누어 진행하였다. [그림 5-2]는 촉진 부식시험의 진행과정을 나타낸 것이다. 진행과정에 대한 설명은 다음과 같다.

1. 강재마감 선정

- 무도장, 우레탄, 광명1, 2, 3단, 불소 도장 및 스테인리스201, 304, 316, 430

2. 인공 비래염분 부착

- 촉진 비래염분 시뮬레이터 사용

3. 강재마감별 표면 부착 비래염분량 측정

- 동일 시편 2개를 이용, 하나는 부착량 측정, 하나는 항온항습 챔버 이용 촉진 부식 및 관찰용

4. 부식 촉진을 위해 항온항습 챔버 이용

- KS F 2599에 준해 실험실시(온습도 변화 사이클)

5. 주기별로 부식진행 상황 관찰(사진촬영)

- 부식진행 상황 사진촬영
- 부식사진에 화상처리기법을 사용하여 부식면적률(KS D 8334) 계산

6. 강재마감별로 시간의 경과에 따른 부식 저항성 평가

- 강재마감별 부식면적률을 통해 평가

[그림 5-2] 촉진 부식시험의 과정

(1) 촉진 부식

촉진 비래염분 시물레이터의 가동시간에 따라 시편 표면에 부착되는 비래염분량을 인위적으로 조절하였다. 시편거치대 (3, 2), (3, 3)위치에서 일정한 양의 비래염분 8.20, 8.18mg/dm²/day이 지속적으로 측정되는 것을 확인한 바, 이 2곳에서만 시편을 거치하여 실험을 진행하였다.

정량의 비래염분이 부착된 시편 2개 중에서 1개를 150g의 증류수가 담긴 용기에 넣은 후, 붓을 이용하여 시편 표면에 부착되어 있던 비래염분을 세척하였다. 다음으로 증류수 50g 담긴 세척병을 통해 시편 표면을 씻어내려 총 200g이 되도록 하였다. [그림 5-3]은 시편 표면에 부착된 비래염분을 채취하는 과정을 나타낸 것이다. 이후 전처리를 마친 200g의 용액



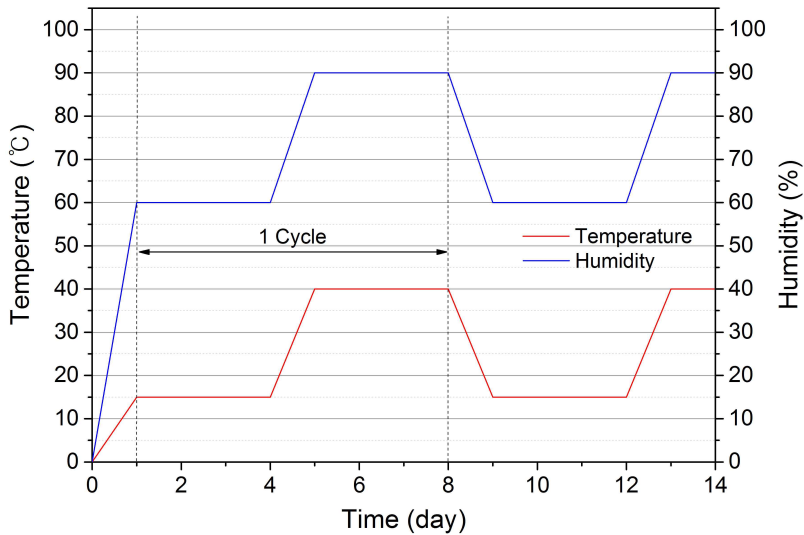
(a) 증류수 150g

(b) 1차 붓으로 세척



(c) 2차 50g의 증류수로 세척

[그림 5-3] 부착된 비래염분의 채취과정



[그림 5-4] 촉진 부식시험을 위한 온습도 사이클

에서 50g을 분취하여 전위차 적정법에 의해 염소이온 농도를 측정하였다. 전위차 적정법의 원리는 0.1mol/L의 질산은 용액을 사용하여 염소이온의 농도가 당량점까지 도달하였을 때, 질산은 적정용액의 투입량을 구하는 것이다.

정량의 비래염분이 부착되어 있던 나머지 1개의 시편은 촉진 부식시험을 위해 KS F 2599에 준하여 온습도 사이클 환경이 조성된 항온항습 챔버 내에서 7일 사이클로 부식정도를 관찰하였으며 컴퓨터 화상처리기법으로 부식면적률(KS D 8334)을 평가하였다. [그림 5-4]는 건조 및 습윤 조건을 나타낸 것으로 습윤기간(온도 40℃, 습도 90%)을 3일, 건조기간(온도 15℃, 습도 60%)을 4일로 하여 전체 7일을 1사이클로 하여 최대 20사이클까지 실험을 진행하였다.

(2) 폭로 부식

[그림 5-5]는 폭로 부식시험의 진행과정을 나타낸 것이다. 실험환경에 폭로시킨 강재마감별 시편들의 부식정도를 파악하여, 마감재별로 방식(차염)성능을 확인하기 위한 실험이다. 실험 전경을 [그림 5-6]에 나타내었다.

1. 강제마감의 선정

- 무도장, 우레탄, 광명1, 2, 3단, 불소 도장 및 스테인리스201, 304, 316, 430

2. 폭로 부식시험 거치대 제작

- KS D 0060에 준해 제작(시편거치대의 각도 30도)

3. 비래염분 포집기 설치

- 폭로 부식시험 거치대 상단에 설치
- 3주 단위로 비래염분이 부착된 거즈 수거

4. 시편 부식상태 관찰

- 3주 단위로 시편수거 후 사진촬영
- 촬영 후 재설치

[그림 5-5] 자연폭로 부식시험의 과정



[그림 5-6] 폭로 부식시험 전경(동(同) 위치 비래염분 포집기 설치)

위치 조건으로는 부산광역시 영도구 소재 한국해양대학교 내, 해안선에서 이격거리 10m, 해수면에서 높이 2.2m지점이며 해안을 정면으로 바라보는 방향(북서쪽)으로 설치하였다. 강제시편은 KS D 0060의 옥외폭로시험 방법 통칙에 준해, 시편거치대의 각도가 30도로 제작된 폭로시험 장치에 설

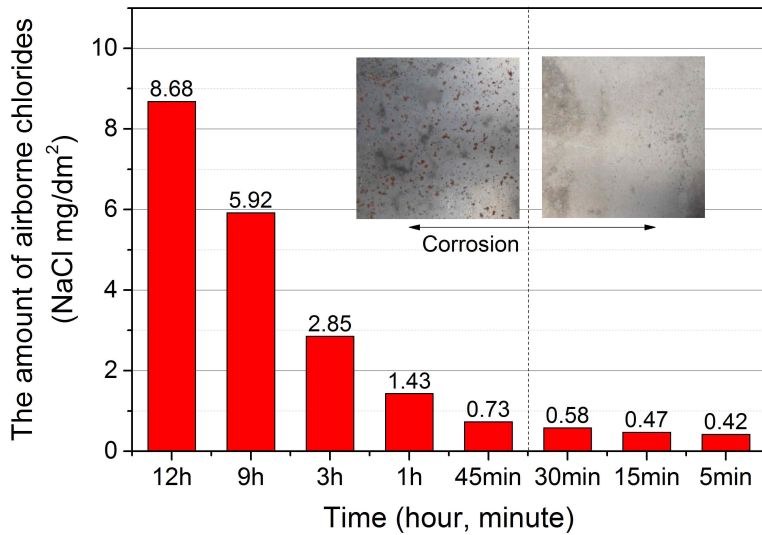
치하였다. 강재의 부식정도는 KS D 8334 도금의 내식성 시험방법에 준하여 외관평가를 실시하였으며, 외관을 사진으로 기록, 관찰하였다. 부식 여부 확인을 위해 3주마다 부식된 정도를 사진으로 촬영하였으며, 폭로 기간은 21주까지 진행하였다. 시편의 폭로위치와 동일한 지점에 비래염분 포집기를 설치(실해양환경에서 발생하는 비래염분량 동시 측정)하여 폭로 기간의 대기 중 비래염분량을 측정하였다. 그 결과 6주 동안 3.29mg/dm^2 , 9주 동안 6.60mg/dm^2 의 비래염분량이 측정되었다.

5.3 실험 결과 및 분석

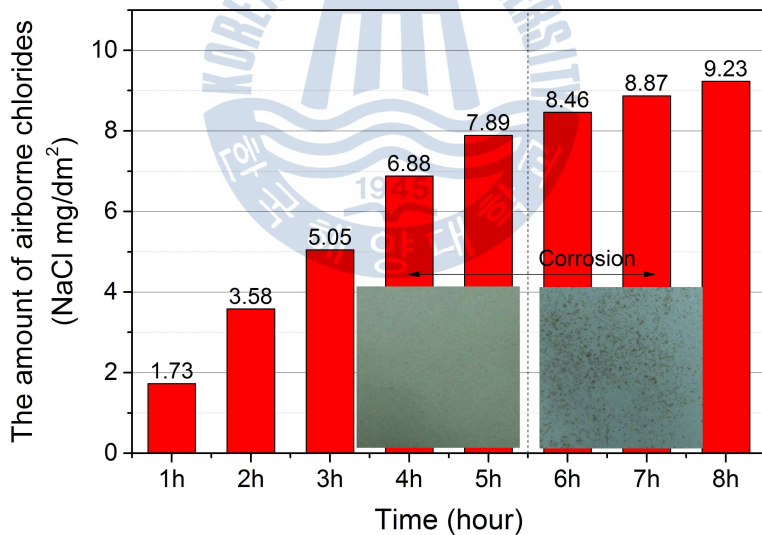
5.3.1 촉진 비래염분 환경의 강재 부식

무도장 시편의 경우, 8.68mg/dm^2 의 비래염분을 부착시킨 후 촉진 부식 시험을 실시하였다. 1일 경과시점에서 점녹현상이, 2일차에 전(全)표면에서 부식이 발생된 것을 확인하였다. 이 값의 설정은 Trial and Error 방식으로 설정된 값으로, 8.68mg/dm^2 을 기점으로 점차 부착량을 줄여가는 방법으로 실험을 진행하였다. 이는 도막이 있을 경우 무도장 보다는 방식(차염)효과가 있어 부식개시에 소요되는 시간이 더 길 것으로 판단하여 수립된 계획이다. [그림 5-7]은 무도장 시편 표면에 비래염분의 부착량을 달리하며, 부식의 발생 여부를 관찰한 것이다. 관찰결과 약 0.58mg/dm^2 에서는 부식이 발생되지 않는 것을 확인하였다. 이와 같은 실험 결과를 미뤄볼 때 무도장 시편의 경우, 비래염분량이 약 $0.58\sim 0.73\text{mg/dm}^2$ 사이에서 부식이 개시되는 것으로 판단된다.

우레탄도장 시편의 경우, 1.73mg/dm^2 의 비래염분을 부착시킨 후 촉진 부식시험을 실시하였다. 하지만 35일(5cycle)의 경과에도 부식이 발생되지 않아 1.73mg/dm^2 의 비래염분량을 기점으로 점차 부착량을 늘려가는 방식으로 실험을 진행하였다. [그림 5-8]은 우레탄도장 시편 표면에 비래염분의 부착량을 달리하며, 부식의 발생 여부를 관찰한 것이다. 관찰결과 약 $7.89\sim 8.46\text{mg/dm}^2$ 의 부착량에서 부식이 발생되는 것을 확인하였다. [그림

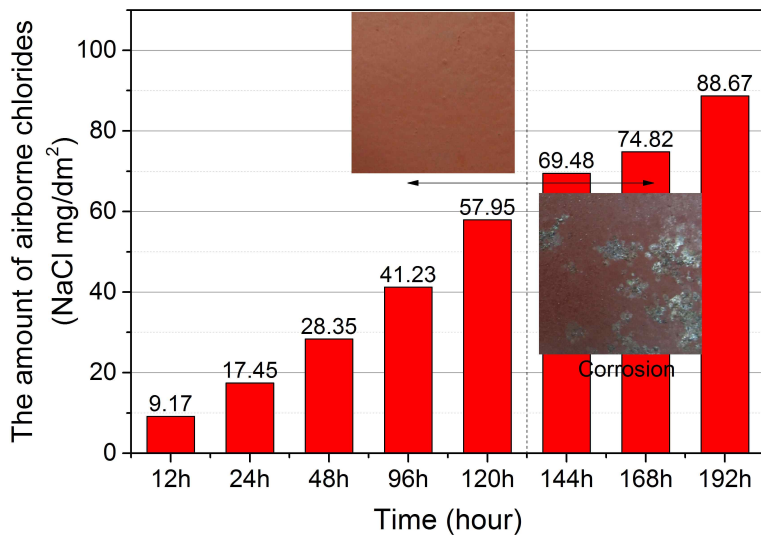


[그림 5-7] 부착 비래염분량에 따른 무도장의 부식 저항성



[그림 5-8] 부착 비래염분량에 따른 우레탄도장의 부식 저항성

5-9]은 광명1단도장 시편 표면에 비래염분의 부착량을 달리하며, 부식의 발생여부를 관찰한 것이다. 광명1단도장 시편의 경우, 비래염분 부착량 9.17mg/dm²에서 촉진부식을 개시하였으며 88.67mg/dm²까지 부착량을 늘



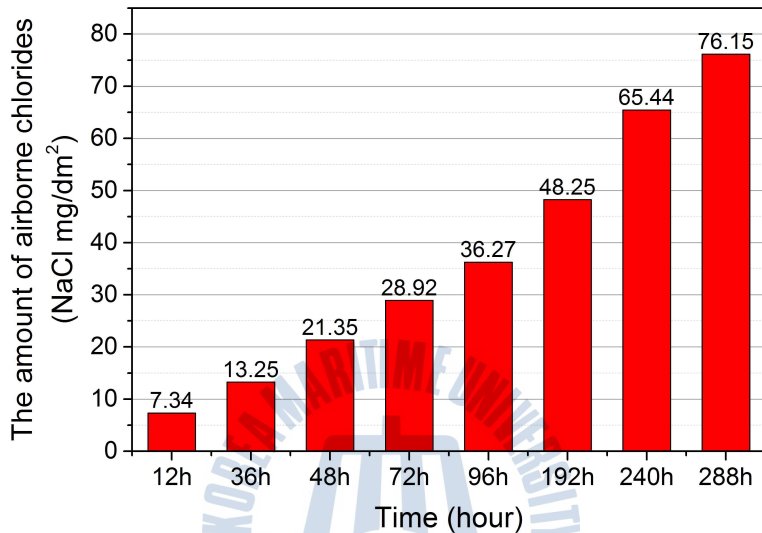
[그림 5-9] 부착 비래염분량에 따른 광명1단도장의 부식 저항성

려가며 실험을 실시하였다. 그 결과, 촉진 부식시험 56일(8cycle)의 경과에도 57.95mg/dm²이 부착된 시편에서는 부식이 관찰되지 않았다. 하지만 69.48mg/dm²의 부착량에서 부식촉진 42일차(6cycle)에 균일부식(Uniform Corrosion)이 관찰되었다. 이와 같은 결과를 미뤄볼 때 광명1단도장의 경우, 시편 표면에 부착된 비래염분량이 57.95mg/dm²초과 69.48mg/dm²미만의 범위에서 마감재의 방식(차염)성능이 상실되는 것으로 판단된다. 범위가 넓은 관계로 더욱 세밀한 부착량을 통해 마감재 방식(차염)효과의 정도를 찾아야 할 것으로 생각된다. 광명 2단과 3단 도장은 100.00mg/dm² 이상의 부착 비래염분량으로 촉진 부식시험을 98일(14cycle)을 진행하였음에도 부식이 발견되지 않아 2단, 3단의 광명단도장은 건전(健全)상태에서는 비래염분의 차단효과가 상당히 우수한 것으로 판단된다.

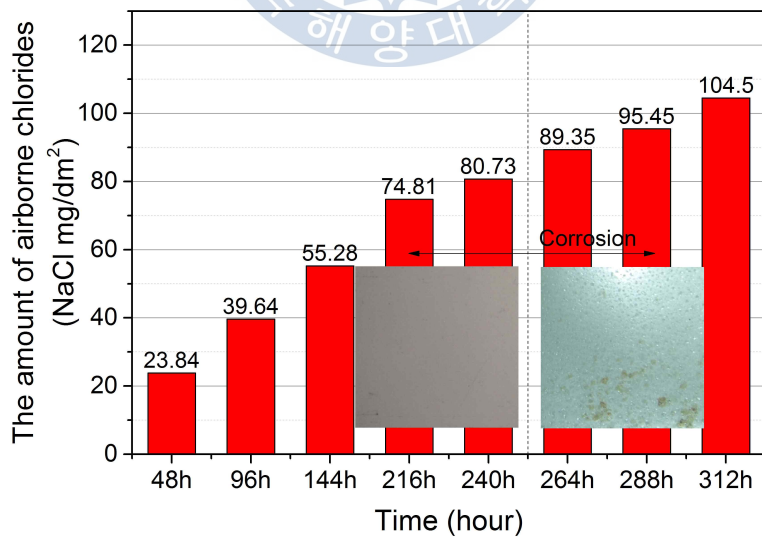
[그림 5-10]은 비래염분 부착량을 실험변수로 불소도장 시편의 부식을 관찰한 결과이다. 불소도장 시편의 경우, 비래염분 부착과정에서 타 마감시편들에 비해 가장 적은 양이 부착되는 것을 확인하였다. 76.15mg/dm²의 다량의 비래염분을 부착시켰음에도 부식이 발생되지 않는 것은 광명2, 3

단과 같이 불소도장이 비래염분의 침투를 사전에 차단한 결과임을 추정할 수 있다.

[그림 5-11]은 스테인리스201 시편 표면에 비래염분의 부착량을 달리하



[그림 5-10] 부착 비래염분량에 따른 불소도장의 부식 저항성

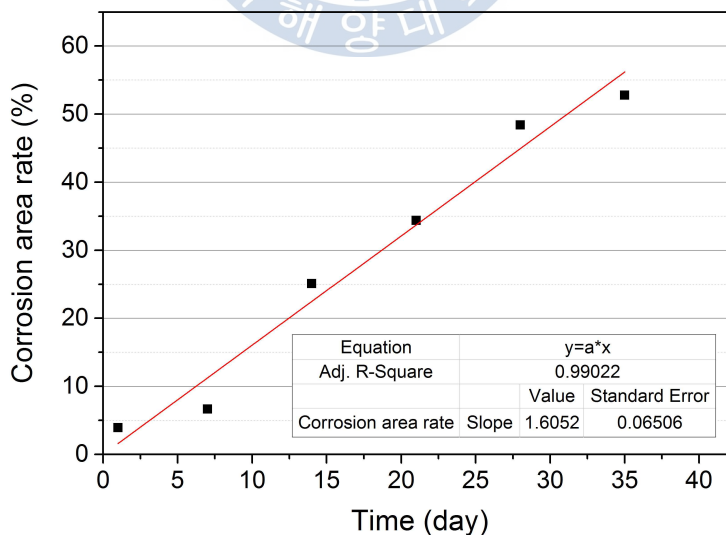


[그림 5-11] 부착 비래염분량에 따른 스테인리스201의 부식 저항성

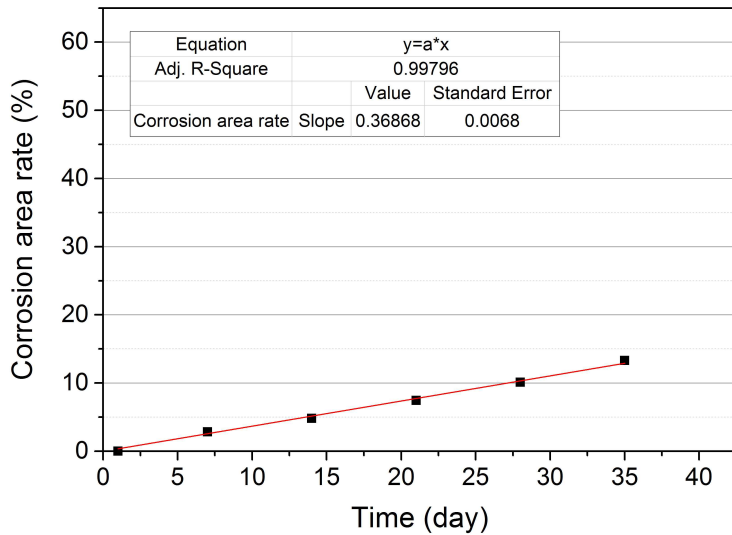
며, 부식의 발생 여부를 관찰한 것이다. 스테인리스201 시편의 경우 비례염분 부착량 23.84mg/dm^2 에서 촉진 부식시험을 시작하여, 104.50mg/dm^2 까지 점차 늘려가며 실험을 실시하였다. 그 결과 89.35mg/dm^2 의 부착량에서 촉진 부식 63일차(9cycle)에 부분적인 점녹현상이 발생하였다. 확실한 전면부식의 상태를 관찰하기 위해서는 촉진 부식시험의 기간을 늘려야 할 것으로 판단된다. 스테인리스304, 316, 430에서는 시편 표면에 최대 150mg/dm^2 이상의 부착 비례염분량을 늘려가며 실험을 실시하였으나 부식을 발견할 수 없었다.

부식이 개시된 후, 마감재별로 방식(차염)성능의 상실속도를 계산하기 위해, 경시변화 부식면적을 데이터를 이용하여 강제마감별 부식속도를 도출하였다. [그림 5-12]는 시간의 경과에 따른 무도장 시편의 부식속도를 나타낸 것이다. 회귀분석 결과 무도장 시편에서의 부식속도는 1.60의 계수를 가지는 것으로 확인되었다.

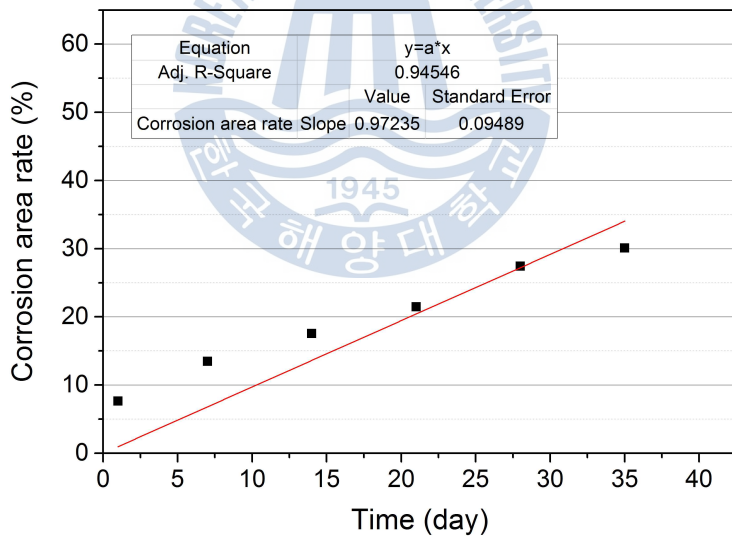
[그림 5-13]은 우레탄도장 시편의 결과로서 부식면적을 진행속도는 0.36의 계수를 가지는 것으로 확인되었다.



[그림 5-12] 무도장의 부식속도

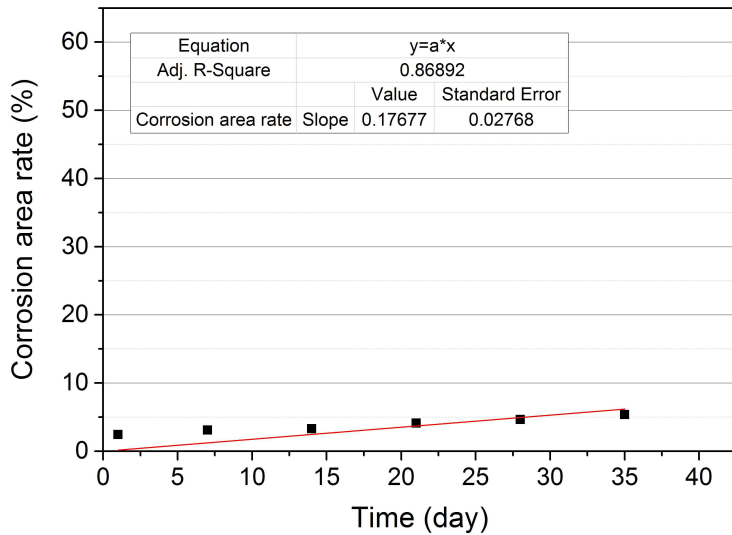


[그림 5-13] 우레탄도장의 부식속도



[그림 5-14] 광명1단도장의 부식속도

[그림 5-14]는 시간의 경과에 따른 광명1단도장 시편의 부식속도를 나타낸 것이다. 광명1단도장 시편의 부식개시 후 부식 진행속도는 0.97의 계수 값이 나왔으며, 이는 [그림 5-15]의 스테인리스201 시편의 0.17에 비하





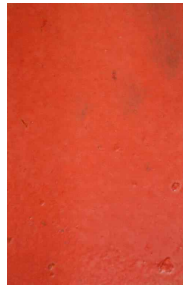















[그림 5-15] 스테인리스201의 부식속도



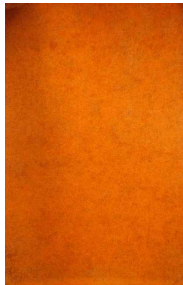


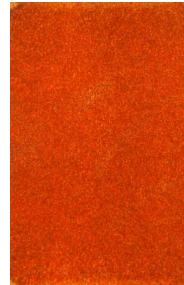
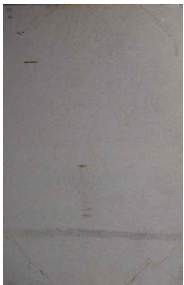





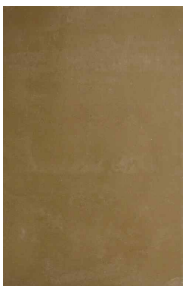





여 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 스테인리스와의 성분 차가 있겠지만 광명1단도장에 비해서는 상당한 방식(차염)효과가 있으며 광명단도장의 재료적인 열화를 포함하여 고려할 때 그 효과는 더욱 탁월할 것으로 사료된다.

5.3.2 자연 폭로에 의한 강재 부식

[그림 5-16]부터 [그림 5-19]까지는, 6주에서 21주까지 폭로 부식시험을 진행한 강재마감별 시편들의 부식 경과사진을 나타낸 것이다. 또한 [그림 5-20]에 폭로 부식시험 기간 동안 측정된 주변 기상조건을 나타내었다.

	6주	9주	12주	15주	18주	21주
광명1단						
광명2단						
광명3단						

[그림 5-16] 광명1단, 2단, 3단도장의 부식상태

	6주	9주	12주	15주	18주	21주
무도장						
우레탄도장						
불소도장						

[그림 5-17] 무도장, 우레탄도장, 불소도장의 부식상태

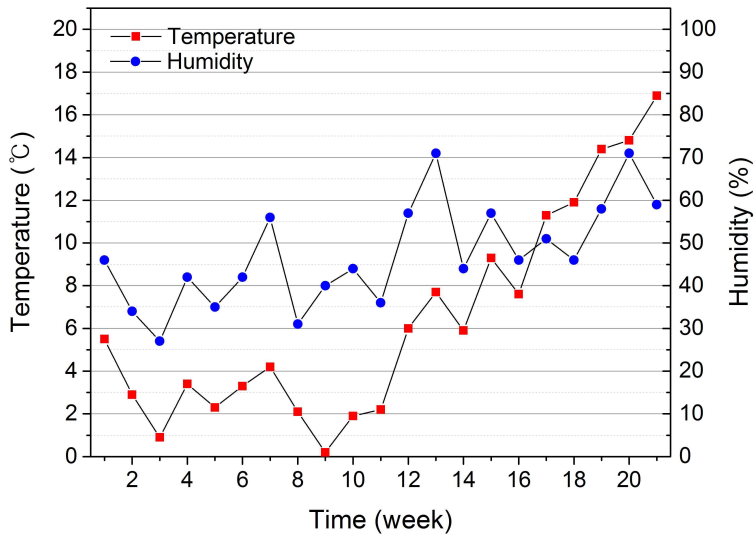
	6주	9주	12주	15주	18주	21주
스테인리스 201						
스테인리스 304						
스테인리스 316						

[그림 5-18] 스테인리스201, 304, 316의 부식상태

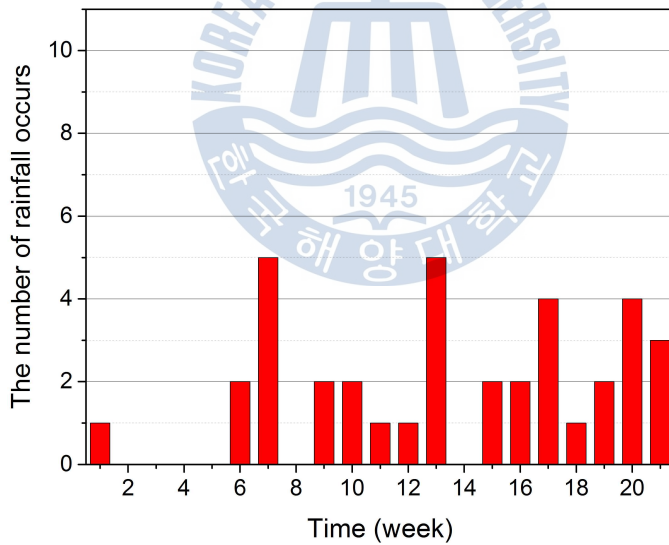
	6주	9주	12주	15주	18주	21주
스테인리스 430						

[그림 5-19] 스테인리스430의 부식상태





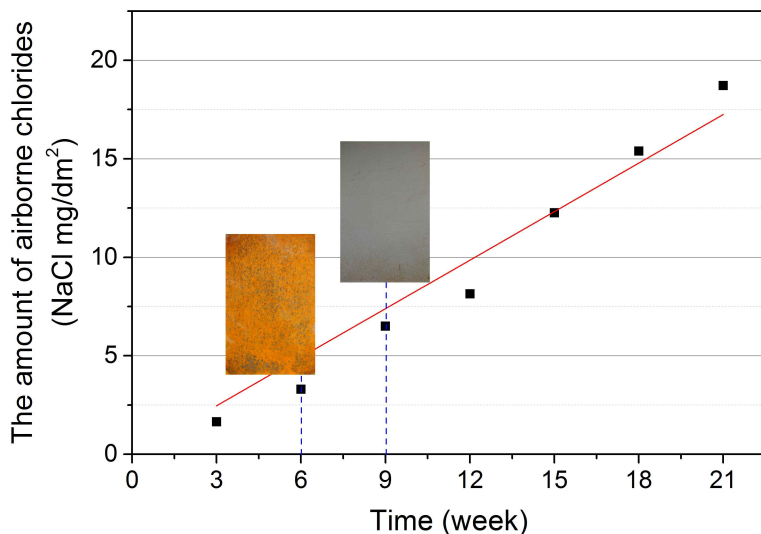
(a) 온도 및 습도



(b) 강우 발생 횟수

[그림 5-20] 폭로 부식시험 기간 중의 기상조건

광명단도장을 실시한 경우, 도포횟수와 관계없이 부식이 발생하지 않았다. 하지만 무도장의 경우, 시편 전면에 걸쳐 부식이 발생하였으며 우레



[그림 5-21] 폭로 부식시험 결과(비래염분량 비교)

탄도장의 경우에도 시편 면적의 70%이상에 걸쳐 부식이 발생된 것을 확인하였다. 불소도장의 경우 부식이 전혀 관찰되지 않았으며 스테인리스 시편의 경우에도 종류와 관계없이 부식을 발견할 수 없었다. 이러한 시편의 부식관찰은 비래염분 측정에 맞춰 3주 단위로 실시하였으며, [그림 5-21]에 측정된 비래염분량과 부식이 개시된 강재시편 사진을 시기별로 비교하여 나타내었다. 10종의 강재를 대상으로 폭로 부식시험을 실시한 결과, 21주 동안 2종의 시편에서 부식이 발견되었다. 그 중에서 무도장의 경우, 폭로 6주째, 대기 중 비래염분량 3.29mg/dm^2 에서 시편의 전면에 걸친 부식(전면부식 uniform corrosion)을 관찰할 수 있었다. 우레탄도장의 경우, 폭로 9주째, 대기 중 비래염분량이 6.60mg/dm^2 에서 부식이 발생되었으며, 시편의 부식은 무도장과는 달리 시편의 아래쪽 부분부터 발생하여 상부로 확대해 가는 양상을 보였다. 이는 폭로 시편거치대가 기준 KS D 0060에 준하여 각도 30도로 기울어져 있으며, 45차례의 강우에 의해 비래염분이 시편의 아랫부분으로 씻겨 내려가 축적되어 염분농도가 다소 상승한 영향도 있는 것으로 판단된다.

[4장 대기 중 비래염분량과 건축마감재별 부착 비래염분량의 관계]에서 무도장의 비래염분 부착율은 건식거즈와 비교하면 24%의 부착율을 가지는 것으로 실험결과 도출되었다. 이를 본 폭로 부식시험에서의 결과와 비교하면, 폭로시험 6주 경과 시, 건식거즈에 부착된 비래염분량은 3.29mg/dm^2 으로서 무도장의 비래염분 부착율 29%를 적용하면 0.65mg/dm^2 으로 변환할 수 있다. 이는 촉진 부식시험을 통해 분석된 무도장의 방식(차염)성능 상실범위 $0.58\sim 0.73\text{mg/dm}^2$ 사이로 나타나 이를 부식을 유발하는 최소 비래염분량으로 적용하여도 무관할 것으로 생각된다.

우레탄도장의 경우, 건식거즈와 비교해 부착율이 69%로, 폭로시험 9주간 측정된 비래염분량을 부착된 비래염분량으로 환산하면 4.55mg/dm^2 이다. 촉진 부식시험의 결과로 우레탄도장은, $7.89\sim 8.46\text{mg/dm}^2$ 에서 방식(차염)성능이 상실되지만 폭로 부식시험의 결과에서는 4.55mg/dm^2 에서 상실되는 것으로 나타났다. 이는 무도장의 경우, 극소량의 비래염분만으로도 부식이 시작되어 타 환경인자의 영향이 미치는 시간적인 여유가 없었지만 우레탄도장의 경우, 9주간의 폭로시험에서 강우의 영향을 받는 등 비래염분과 강우 등의 복합적인 부식작용에 의해 마감재의 방식(차염)성능이 빠르게 상실된 것으로 판단된다.

광명단도장, 불소도장, 스테인리스 등에서는 폭로 부식시험 21주의 경과에도 부식여부를 확인하지 못했다. 이는 촉진 부식시험을 통한 부식 비래염분량 범위에도 못 미치는 값으로 부식이 시작되지 못한 것으로 판단된다. 우레탄도장 결과에 비춰볼 때, 촉진 부식을 통한 마감재의 방식(차염)효과 결과 값은 장기간의 폭로 부식시험에 비해 다소 과대평가가 되는 것으로 판단된다.

5.4 소결

본 5장에서는 강제마감별로 방식(차염)성능의 평가를 위해, 촉진 부식시험과 폭로 부식시험을 병행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 촉진 부식

- 1) 강재의 종류 및 마감방식에 따라 각각의 부식 임계점이 존재하였으며, 무도장과 우레탄도장, 광명1단도장, 스테인리스201의 방식(차염)성능 상실범위는 부착 비래염분량 0.58~0.73, 7.89~8.46, 57.95~69.48, 80.73~89.35mg/dm²인 것으로 평가되었다.
- 2) 광명2 및 3단, 불소도장, 스테인리스304, 316, 430의 경우, 최대 약 150.00mg/dm² 이상까지 부착 비래염분량을 늘려 촉진 부식시험을 실시하였으나 부식생성을 확인하지 못해 우수한 방식(차염)효과를 발휘하는 것으로 판단된다.
- 3) 부식진행속도 산정결과 무도장, 우레탄도장, 광명1단도장, 스테인리스 201의 계수는 각각 1.60, 0.36, 0.97, 0.17로 나타나 부식이 시작된 후, 무도장이 가장 빠른 부식속도(방식(차염)성능 상실속도)를 가지는 것으로 확인하였다.
- 4) 통상적으로 강재의 마감으로 사용되는 광명1단도장은 폭로 환경조건에 따른 편차가 있겠지만 대략, 해안 10m에서 160일을 전후에서 마감재의 방식(차염)효과가 상실될 것으로 예상되며 목표 내용연수에 따라 도장횟수를 달리해야 할 것으로 사료된다.

(2) 폭로 부식

- 1) 해안가 실환경에서 21주간 폭로시험을 실시한 결과 무도장 강재의 경우, 폭로 6주째, 대기 중 비래염분량이 3.29mg/dm², 부착 비래염분량 0.65mg/dm²에서 시편의 전면에 걸친 부식을 관찰할 수 있었으며, 우레탄을 도포한 강재의 경우, 폭로 9주째, 대기 중 비래염분량 6.60mg/dm², 부착 비래염분량 4.55mg/dm²에서 방식(차염)효과가 상실되는 것을 확인하였다.
- 2) 21주간의 폭로 부식시험 결과, 강재표면에 도포도장을 실시한 광명단 및 불소도장의 경우, 도포횟수와는 관계없이 부식되지 않았으며, 전

종류의 스테인리스에서도 부식을 관찰할 수 없어, 실제 해안지역에 적용하여도 우수한 방식(차염)효과를 발휘할 것으로 판단된다.



제 6 장 결 론

염화물이온으로 구성되어 있는 비래염분은 해안지역에 위치한 구조물의 강재를 부식시켜, 전반적인 구조 내력을 약화시킨다. 이와 같은 문제를 예방하기 위해, 구조물 표면에 각 종 마감재 등을 적용하여 비래염분의 침투를 사전에 차단하고 있지만 대기 중의 비래염분량에 비해 마감재별로 부착되는 비래염분량이 상이하여, 최적 내식성 발휘를 위한 마감재를 선정하는데 어려움이 많다. 이에 본 연구에서는 우선 극한 염해환경으로 고려되는 해안지역의 대기 중 비래염분을 정량화하고자 하였으며, 그 과정에서 개발된 다방향 포집기를 이용하여, 구조물의 입지조건과 주변 기후 조건에 따라 대기 중의 비래염분을 나타내는 정량식을 도출하였다. 아울러 대기 중의 비래염분량과 각 종 건축마감재에 부착되는 비래염분량의 차이를 비교 분석하여, 실측을 통해 정량화한 대기 중의 비래염분량을 각 종 건축마감재별 표면에 부착되는 비래염분량으로 환산되도록 유도하였다. 또한 촉진 및 폭로 부식시험을 통해 각 종 마감재를 적용한 강재의 부식정도를 파악하여, 마감재별로 비래염분에 의한 부식 저항성을 평가하였다. 앞서 기술한 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 해안지역 대기 중의 비래염분 정량화

비래염분을 운반하는 바람은 1방향에서 일정하게 불어오지 않고 여러 방향에서 불규칙적으로 불어오며 특히, 해안지역에 위치한 구조물의 경우, 해안을 바라보는 방향뿐만 아니라 측면과 후면에서도 해풍의 영향을 받는다. 즉, 전달되는 비래염분에 방향특성을 부여하는 것은 구조물의 입지조건에 따라 내염설계를 각 방면별로 분리하여 적용할 수 있기 때문이

다. 하지만 거리, 높이별로 대기 중의 비래염분량을 나타내는 기존의 정량식은 1방향에서만 비래염분을 측정하는 포집기로 산출한 식으로 대기 중에 부유하고 있는 비래염분의 유동특성을 정확히 반영하지 못하는 단점이 있다. 또한 대기 중 비래염분을 측정하는 기구인 포집기마다 포집능력이 상이하여 기준 값을 산정하는데도 문제가 있었다. 이에 본 연구에서는 구조물의 입지조건에 따라 주변 비래염분의 분포특성을 명확히 분석하기 위해, 구조물의 위치를 기준으로 8방향에서 날아오는 비래염분을 측정하는 다방향(8방향) 포집기를 개발하였으며, 이를 실제 해양환경에 적용하여 계절별, 방향별로 비래염분의 분포특성을 평가, 해안선에서의 거리와 해수면에서의 높이를 고려한 비래염분 정량식을 도출하였다. 또한 바람의 유동이 비래염분 전달에 지배적인 관계로 구조물 주변의 기상조건 즉, 바람의 발생빈도, 풍속에 따른 비래염분 유동특성을 분석하여 이에 상응하는 정량식을 도출하였다. 본 연구에서 수행한 비래염분의 정량화 과정을 적용한다면, 해안지역에 건설되는 구조물의 입지조건을 기준으로 주변 대기 중의 비래염분량 추정이 가능할 것으로 판단된다.

(2) 대기 중 비래염분량과 건축마감재별 부착 비래염분량의 관계

앞서서 정량화를 통해 도출된 대기 중 비래염분량을 기준으로, 각 구조물 표면에 부착되는 비래염분량을 산정하기 위해 축진 비래염분 시뮬레이터를 사용하여 건축마감재별로 비래염분의 부착특성을 평가하였다. 건식 거즈를 통해 포집된 비래염분을 대기 중의 전(全) 비래염분량이라 가정하고 이를 지표로 상대적인 비교를 한 결과, 모르타르는 약 60%, 강재는 30%, 타일은 25%의 부착비율을 나타내었으며, 이 차이는 표면의 상태 즉, 도료 도포의 유무와 그에 따른 표면 거칠기의 변화에 기인하는 것으로 확인하였다. 또한 건축마감재에 대한 해풍의 입사각도에 따라 비래염분의 부착비율이 달라지며, 입사각도가 90° 인 경우 30° , 45° 에 비해 약 2.5~3.0배 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 실험결과에 의하면, 해안에서의 이격거리가 같은 구조물이라도 해풍에 면하는 마감재의 각도에 따라

부착량은 크게 달라지며 향후, 해풍의 유동방향을 병행하여 고려할 때, 구조물에 부착되는 비래염분량을 정확히 설정할 수 있을 것으로 사료된다. 마지막으로 각 종 마감재 표면에 부착된 비래염분이 강우의 세정작용에 의해 유실되는 정도를 분석하였으며, 그 결과 건축마감재별로 비래염분의 유실율은 상이하며, 이는 표면의 상태와 강우량에 크게 의존하는 것으로 밝혀졌다. 적은 강우량에는 비레하나 강우량이 많을수록 초기에 급격히 유실되는 경향을 확인하였다. 향후, 시간당 강우량 정보에 대하여, 마감재별 상태에 따라 세정되는 정도를 예측할 수 있다면 내염설계를 위한 경계조건인 표면염화물량 산정에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 부착 비래염분량에 따른 강재마감별 부식 저항성 평가

마지막으로 부착 비래염분량에 따른 강재마감별 부식 저항성을 평가하였다. 부착 비래염분량에 따른 각 종 마감재의 부식 저항성을 규명하기 위하여 축진 비래염분 시뮬레이터를 이용, 축진 부식시험을 실시하였으며, 실제 해양환경의 다변하는 상황을 반영하기 위해 폭로 부식시험 또한 병행하였다. 축진 부식시험 결과, 강재의 종류 및 마감방식에 따라 부식 저항성이 상이한 것을 확인하였으며, 무도장과 우레탄도장, 광명1단도장, 스테인리스201의 경우, 부착 비래염분량이 각각 0.58~0.73, 7.89~8.46, 57.95~69.48, 80.73~89.35mg/dm²에서 마감재의 방식(차염)성능이 상실되는 것으로 확인하였다. 광명2 및 3단, 불소도장, 스테인리스304, 316, 430의 경우, 최대 약 150.00mg/dm² 이상까지 부착 비래염분량을 늘려가며 축진 부식시험을 실시하였으나 부식생성을 확인하지 못해 우수한 방식(차염)효과가 있는 것으로 판단된다. 또한 실제 해양환경에서 21주간 폭로 부식시험을 실시한 결과, 무도장의 경우, 폭로 6주째, 대기 중 비래염분량 3.29mg/dm², 부착 비래염분량 0.65mg/dm²에서 시편의 전면에 걸친 부식을 관찰할 수 있었으며, 우레탄을 도포한 강재의 경우, 폭로 9주째, 대기 중 비래염분량 6.60mg/dm², 부착 비래염분량 4.55mg/dm²에서 부식 발생을 관

찰한 바, 이 값에서 마감재의 방식(차염)효과가 상실됨을 확인 할 수 있었다. 21주간의 폭로 부식시험 결과, 강재표면에 광명단 및 불소도장을 실시한 경우, 도포횟수와 관계없이 부식하지 않았으며, 스테인리스 강재에서도 부식을 관찰할 수 없어 우수한 방식(차염)성능을 가지고 있는 것으로 판단된다.

지역별로 구조물의 입지조건과 주변 기후조건에 따라 대기 중에 분포하고 있는 비래염분량은 다소 상이하지만 본 연구에서 개발된 다방향 포집기를 이용해 정량화할 수 있으며, 이 정량화를 통해 도출된 값은 각 종 마감재별로 표면에 부착되는 비래염분량으로 환산할 수 있다. 또한 부착 비래염분량에 따라 각 종 마감재의 부식 저항성을 검토한 결과는 향후, 대기 중의 비래염분량이 확인된 지역에서 건설되는 구조물에 최적의 내식성을 발휘하는 마감재를 선정하는데 큰 도움을 줄 것으로 사료된다.



참고문헌

- 青木慶彦, 上浦健司, 福地大樹, 下村匠, 2010. 風洞試験による飛來塩分を受けるモルタルの表面塩分量および塩分浸透性狀の検討, *コンクリート工學年次論文集*, 32(1), pp.821-826.
- 藤原博, 田原芳雄, 1997. 鋼橋塗裝の長期防食性能の評価に関する研究. *土木學會論文集*, 570, pp.129-140.
- 藤原博, 田原芳雄, 1997. 新設鋼道路橋に適用する重防食塗裝系に関する研究. *土木學會論文集*, 563, pp.23-34.
- 本橋健司, 樫野紀元, 富板崇, 1986. 清水市における飛來海鹽粒子に関する研究. *日本建築學會構造系論文報告集*, 366, pp.1-10.
- 富板崇, 樫野紀元, 高根由充, 1988. 鹽粒子捕集量におよぼす氣象因子の影響. *日本建築學會構造系論文報告集*, 384, pp.34-41.
- 山田義智, 大城武, 梶田佳實, 1998. 海岸付近における飛來鹽分量に関する解析的研究. *日本建築學會構造系論文集*, 514, pp.21-26.
- 山田義智, 大城武, 谷川伸, 伊部博, 1995. 飛來塩分量とコンクリート中への塩分浸透過程に関する一考察. *コンクリート工學年次論文報告集*, 17(1), pp.973-978.
- 山田義智, 大城武, 梶田佳寛, 1997. コンクリート中への塩分浸透過程および蓄積量に関する解析的検討. *コンクリート工學年次論文報告集*, 19(1), pp.494-954.
- 山田文則, 細山田得三, 下村匠, 2007. 海岸に隣接した構造物周辺の飛來塩分の發生・輸送過程とその長期的な予測計算. *海岸工學論文集*, 54, pp.1216-1220.
- 山田文則, 細山田得三, 2004. 海岸構造物への飛來塩分の付着過程に関する研究. *海岸工學論文集*, 51, pp.1126-1130.

- 小窪幸恵, 岡村甫, 2009. 海水飛沫の発生過程に着目した飛來塩化物イオン量の算定モデル. *土木學會論文集B*, 65(4), pp.259-268.
- 仲座榮三, 1998. 強風時の飛來塩分量と降雨中塩分濃度に關する研究. *海岸工學論文集*, 45, pp.1176-1180.
- 仲座宋三, 津山正光, 北材麻司, 1999. 台風時における大氣中の海鹽濃度分布に關する研究. *海岸工學論文集*, 46, pp.1251-1255.
- 青山實伸, 松田哲夫, 鳥居和之, 2003. 海岸部コンクリート構造物の鹽化物イオンの表面濃度と擴散係數. *コンクリート工學年次論文集*, 25(1), pp.683-688.
- 風間洋, 山田義智, 2004. 飛來鹽盆量の移流擴散解析. *日本コンクリート工學年次論文報告集*, 26(1), pp.795-800.
- 宇多高明, 小俣篤, 小西正純, 1992. 海岸からの飛來塩分量の計算モデル. *海岸工學論文集*, 39, pp.1051-1055.
- 佐藤國雄, 笠原隆祐, 塩野計司, 2003. 移流沈降領域における飛來塩分量と風速の關係. *日本コンクリート工學年次論文集*, 25(1), pp.851-856.
- 村上周三, 持田灯, 2003. 加藤信介他局所風況予測システムLAWEPSの開発と検討ながれ. *日本流体力學會*, 22(203), pp.375-386.
- 浜田純夫, 日野伸一, 兼行啓示, 長谷川博, 1986. 海岸付近の飛塩調査とコンクリートに浸透する塩分. *第8回コンクリート工學年次講演會論文集*, pp.85-88.
- 田中正昭, 鳥羽良明, 1993. 台風による塩害と内陸への塩分侵入量について. *京都大學防災研究所年報*, 36(B-2), pp.103-119.
- 青木慶彦, 主指導教員, 下村匠, 2010. 飛來塩分を受けるコンクリート表面における塩分侵入メカニズム. *コンクリート工學年次論文集*, 32(1), pp.821-826.
- 佐伯龍彦, 中村大剛, 2007. 飛來塩分環境下におけるコンクリート表面の鹽化物イオン浸透流束に關する検討. 29(1), pp.1017-1022.
- 廣瀬望, 2008. GISを用いた現地計測と領域氣候モデルの飛來塩分量予測の統合化による耐候性鋼橋梁の腐食環境評価マップの作成.

月永洋一, 壓谷征美, 1991. 国内の鹽分環境をみる. セメント・コンクリート, 532, pp.29-37.

椿龍哉, 定月良倫, EL-DESOUKY, Mohamed Ibrahim, 2011. コンクリート表面に付着した塩化物の表面水流による洗い流し. セメント・コンクリート論文集, 65(1), pp.384-391.

青木慶彦, 2010. 風洞試験による飛來塩分を受けるモルタルの表面塩分量及び塩分浸透性状の検討. コンクリート工學年次論文集, 32(1), pp.821-826.

Mustafa, M. A., Yusof, K. M., 1994. Atmospheric Chloride Penetration into Concrete in Semitropical Marine Environment. *Cement and Concrete Research*, 24, pp.661-670.

Collepari, M., Marcialis, A., Turriziani, R., 1972. Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concrete. *Journal of American Ceramic Society*, 55(10), pp.534-535.

Swatekititham, S., Shima H., Okamura H., 2004. Modeling on chloride attack in concrete structures under marine environments. *Proceedings of the First International Conference of Asian Concrete Federation*, 2, Thailand, pp.918-928.

Swatekititham, S., 2005. Estimation method for the airborne chlorides formation at the Japan coastline. *3rd International Conference of Construction Materials (ConMat'05)*, Canada, Vancouver.

Toishi, K., Yoneyama, K., Sato, K., Shiratori, Y., 1995. Characteristics of marine environmental condition of the Japan sea off Niigata prefecture. *Concrete Under Severe Conditions (CONSEC'95)- Environment and Loading*, pp. 818-827.

Tang Luping., Lars-Olof Nilsson., 1992. Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field. *ACI Materials Journal*, 89(1), pp.49-53.

Anna V. Saetta., Roberto V. Scotta., Renato V. Vitaliani., 1993. Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete. *ACI Materials Journal*, 90(5), pp.441-451.

- P.J. Tumidajski., G.W. Chan., R.F. Feldman., G. Strathdee., 1995. A Boltzmann-Matano Analysis of Chloride Diffusion. *Cement and Concrete Research*, 25(7), pp.1556-1566.
- Dimitri VV., Mark GS., 2003. Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments. *Structural Safety*, 25(4), pp.343-62.
- Andrade C., 1993. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cement and Concrete Research*, 23(3), pp.724-742.
- Mitsuyoshi A., Dan MF., Motoyuki S., 2012. Integration of the effects of airborne chlorides into reliability-based durability design of reinforced concrete structures in a marine environment. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(2), pp.125-134.
- Morcillo M., Chico B., Mariaca L., Otero E., 2000. Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site. *Corrosion Science* 42(1), pp.91-104.
- Bae SH., 2007. Estimation of Critical Chloride Content for Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete by Accelerated Corrosion Tests. *Korean Society of Civil Engineers Journal*. 27(5), pp.771-776.
- Yamashita M. et al., 1994. The long term growth of the protective rust layer formed on weathering steel by atmospheric corrosion during a quarter of a century. *Corrosion Science*, 36(2), pp.283-299
- Zhang QC., 2003. Corrosion behavior of weathering steel in marine atmosphere. *Materials Chemistry and Physics*. 77(2), pp.603-608.
- McDonald RL., Unni CK., Duce RA., 1982. Estimation of atmospheric sea salt dry deposition: wind speed and particle size dependence. *Journal of Geophysical Research* 87(C2), pp.1246-1250.

- Maruya, T., Matsuoka, Y., & Tangtermsirikul, S., 1998. Modeling of chloride ion movement in the surface layer of hardened concrete. *Concrete Library of Japanese Society of Civil Engineers(JSCE)*, (32), pp.69-84.
- Maruya, T., Matsuoka, Y., & Tangtermsirikul, S., 1989. Simulation of chloride movement in hardened concrete. *Concrete Library of Japanese Society of Civil Engineers(JSCE)*, (20), pp.57-70.
- Piyamahant S., 2005. Calculation method for chloride concentration in actual concrete structures located inland. *Proceeding of Annual Meeting of Japan Society of Civil Engineers(JSCE)*, pp.377-378.
- Uji, K., Matsuoka, Y., & Maruya, T., 1990. Formation of an equation for surface chloride content of concrete due to permeation of chloride. *Corrosion of Reinforcement in Concrete, Elsevier Applied Science*, pp.258-267.
- Swatekititham, S., 2004. *Computational model for chloride concentration on concrete surface under actual environmental condition*. Ph.D. Japan: Kochi University.
- 김은겸 등, 1998. 해안콘크리트 구조물의 염화물이온 이동 및 철근 부식에 관한 실험적 연구. *대한토목학회논문집*, 18(1-4), pp.447-455.
- 김인태, 이토 요시토, 2007. 부식촉진실험을 이용한 강교용 무도장 강재의 부식내구성 평가. *한국강구조학회 논문집*, 19(1), pp.79-86.
- 정해문 등, 2002. 해안환경에 위치한 국내 고속도로 교량의 비래염분량 측정결과. *한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집*, 14(1), pp.743-748.
- 정해문, 안태송, 류종현, 안성순, 2003. 국내 해안의 비래염분량 조사결과. *한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집*, 15(2), pp.66-69.
- 이종석, 최원성, 김도겸, 문한영, 2005. 높이에 따른 비래염분량의 감소 특성. *한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집*, 17(1), pp.261-264.
- 이종석, 안기홍, 김도겸, 이장화, 2009. 3년간 비래염분 환경에 노출된 시험체의 염분 침투 특성-시험체의 표면거칠기 및 강우에 따라서. *한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집*, 21(2), pp.347-348.

- 이종석, 김성욱, 이장화, 문한영, 2002. 해안콘크리트 구조물에 비래하는 염분 포집방법에 대한 비교평가. *한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집*, 20(1), pp.545-548.
- 김우재 등, 2010. 부산 및 인천 지역 비래염분 현장 모니터링에 대한 실험적 연구. *대한건축학회 학술발표대회논문집 계획계/구조계*, 30(1), pp.245-246.
- 조규환 등, 2012. 바람의 발생빈도와 속도에 따른 전송 비래염분 정량화. *한국건축시공학회 학술기술논문발표회 논문집*, 12(2), pp.267-268.
- 문한영, 김성수, 유재석, 1995. 염분환경하에 있는 모르타 및 콘크리트 중의 염분 확산에 대한 연구. *대한토목학회논문집*, 15(2), pp.283-292.
- 문한영, 김홍삼, 이승태, 2002. 해수 침식을 받은 콘크리트의 성능저하원인 규명. *대한토목학회논문집*, 22(1-A), pp.171-179.
- 문한영, 이종석, 2004. 해안가 콘크리트 구조물에 비래하는 염분 포집장치 성능에 대한 연구. *대한토목학회논문집*, 24(2A), pp.417-422.
- 박승범, 김도겸, 1999. 해양 구조물의 철근부식 예측기법 개발에 관한 연구. *한국콘크리트학회논문집*, 11(6), pp.89-100.
- 함희정, 서치호, 2006. 비래염의 형성과 풍속의 상관관계에 대한 연구. *대한건축학회논문집 계획계*, 22(10), pp.345-352.
- 구현분, 김의태, 이광명, 2003. 철근 콘크리트 구조물의 염소이온 침투 모델. *콘크리트학회 논문집*, 15(1), pp.25-34.
- 한상훈, 김진근, 김동현, 박우선, 2002. 콘크리트 구조물의 염소이온 침투해석에 대한 확산계수의 영향. *대한토목학회 논문집*, 22(2-A), pp.337-345.
- 이승철, 2007. *해안지역 철근콘크리트 건축물의 비래염분 침투특성*. 박사학위논문. 부산:부경대학교.
- 김현정, 2010. *마감재료에 따른 비래염분의 표면 흡착특성 고찰*. 석사학위논문. 부산:동의대학교.
- 이종석, 2006. *비래염분 측정에 의한 해안 콘크리트 구조물의 표면염분량 추정*. 박사학위논문. 서울:한양대학교.

- 이수용, 1998. *철근콘크리트 내부의 염소이온 이동과 전기적 탈염처리에 관한 실험적 연구*. 박사학위논문. 부산:동아대학교.
- 이철민, 2005. *해안지역 콘크리트 구조물의 비래염분 흡착 및 침투에 관한 실험적 연구*. 석사학위논문. 부산:부경대학교.
- 장범식, 2008. *보수된 콘크리트 구조물에서의 염화물 침투 예측에 관한 연구*. 석사학위논문. 서울:연세대학교.
- 조규환, 2012. *다방향 비래염분 포집기 개발을 통한 실환경 비래염분 포집 정확도 향상에 관한 연구*. 석사학위논문, 부산:한국해양대학교.
- 이용은, 장태순, 양우석, 1997. *해양 구조물의 염해 방지 대책*, 한국도로공사 도로교통연구원
- 이종석, 김성욱, 김방욱, 안기홍, 2003. *비래염분 및 해사사용 콘크리트의 내구특성 장기조사*, 한국건설기술연구원.
- 송병창, 조원봉, 김형래, 1994. *해안지방의 염분을 고려한 적정창호연구*, 대한주택공사 주택연구소.
- 日本土木研究所, 2001. *高田工事事務所管内の主な橋梁-弁天大橋*, 日本建設省土木研究所.
- 日本土木研究所, 1985. *飛來鹽分量全國調査(I)*, ISSN 0386-5878, 土木研究所資料 第2203號.
- 日本土木研究所, 1988. *飛來鹽分量全國調査(III)-調査結果およびデ-タ集*, ISSN 0386-5878, 土木研究所資料 第2369號.
- 日本土木研究所, 1993. *飛來鹽分量全國調査(IV)-飛來鹽分量の分布特性と風の關係*, ISSN 0386-5878, 土木研究所資料 第3175號.
- 日本土木研究所, 1985. *コンクリート橋の鹽害に關する實橋詳細調査*, ISSN 0386-5878, 土木研究所資料 第2707号.
- 日本土木學會, 1995. *コンクリート構造物の鹽害およびその對策に關する調査研究委員會報告書-その2*, 日本土木學會.

日本コンクリート工學協會, 1990. コンクリート構造物の腐食・防食に關する試験方法ならびに規準(案), pp.203-229.

自動車技術協會, 1991. 自動車用材料腐食試験方法 - 複合サイクル試験の促進性と暴露との相關性, 自動車技術界 Technical paper, p.57.

自動車技術協會, 自動車用材料腐食試験法, 自動車規格, JASO M 609-91.

神谷誠, 藤原博, 三宅將, 1994. 鋼橋塗裝の長期防食性能の評価に關する研究, 日本道路公団試験研究所報告, 31, pp.65-97.

高橋定明, 守屋進, 2003. 塗膜の複合環境腐食促進試験條件の検討. 防錆管理, 47(9), pp.343-349.

大郎信明, 小林明夫, 1987. 鹽害(I) コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 技報堂出版.

JIS Z 2382, 1998. 大氣環境の腐食性を評價するための環境汚染因子の測定.

ISO 9225, International Standard, 1992. Corrosion of metals and alloy - Corrosivity of atmospheres - Measurement of pollution.

감사의 글

박사논문을 마무리하면서 문득, 3년 전 박사과정을 시작했을 당시가 생각납니다. 당시에 저는 박사과정은 고독한 외로움과의 싸움이라고 생각했습니다. 무언가를 밝혀내기 위한 노력들은 많은 고민 끝에 나오는 생각의 정리라고 여겼으며, 그것은 그 누구도 대신해 줄 수 없는 제 자신과의 싸움이라고 생각하였습니다. 지금 저는 제 인생에서의 그 첫 번째 싸움을 이겨내려 합니다. 앞으로 많은 일들이 저를 기다리며, 그 답을 요구하고 있지만 지금까지 꾸준히 해 왔던 경험을 바탕으로 한 걸음씩 앞으로 나아가고자 합니다.

그동안 어렵고 힘들었던 박사과정 중에서도 제게 많은 도움과 희망을 주신 분들에게 지면으로나마 소정의 감사를 전하려 합니다.

먼저, 생각과 고민이 많아 번잡한 마음이 생길 때마다 마음의 위로를 얻게 해주신 하느님과 성모 마리아님께 감사드립니다. 언제 어디서든 어머니의 품속과 같이 마음의 평화를 얻을 수 있어서, 지금까지 힘들었던 그 모든 것들을 헤쳐 나갈 수 있었던 것 같습니다.

연구를 진행하면서 부족하고 어려울 때마다 많은 가르침과 방향을 제시해 주신 박동천 지도교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 교수님의 제자로 근 6년간 학문뿐만 아니라 인생의 많은 것을 배우고 느꼈습니다. 제자의 앞날을 위해 누구보다도 애써주신 점 말로써 감사드리기보다는 마음으로 써 감사드립니다. 항상 건강하셨으면 합니다. 또한 논문의 완성도를 보다 높일 수 있도록 많은 지도를 아낌없이 해 주신 한국해양대학교 이한석 교수님, 송화철 교수님, 도근영 교수님, 이명권 교수님, 안윙희 교수님, 오광

석 교수님, 박수용 교수님, 부산대학교 김영수 교수님, 포스코건설 김우재 박사님께 깊은 감사를 드립니다. 모든 분들께서 논문의 지도뿐만 아니라 좋은 동기부여가 될 수 있도록 제 앞날에 건승을 빌어주신 점 진심으로 감사드립니다. 지도해 주신 분들의 마음을 담아 앞으로 더욱 연구에 정진하는 후학이 되도록 하겠습니다.

[건축시공 및 사업관리 연구실]의 구성원들에게 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 아무런 방향도 제시해 줄 수 없어 한없이 부족했던 저를 지금까지 믿고 따라오며 또한 어려움을 함께 헤쳐나간 이영준, 정재민, 임명현, 변정환, 지동현에게 진심으로 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 언젠가는 행복한 웃음을 지으며 무한한 시너지 효과를 일으키는 팀으로 다시 만날 수 있기를 기대합니다. 김영봉, 권은희 박사과정님은 지금보다도 더욱 연구에 정진하셔서 앞으로 저희 연구실의 좋은 귀감이 되셨으면 합니다.

지금은 연구실을 떠나 멋진 사회생활을 하고 있는 윤은희, 박근석, 강종필, 이해승, 황종욱, 양정필, 곽현에게도 앞으로의 건승을 기원합니다. 이외에도 강영훈 박사님, 홍성기 형님, 구조연구실의 제현민, 천세용, 전민준, 김은혜 조교님 모두 건강하시고 행복하셨으면 합니다.

마지막으로 저의 가족 모두의 든든한 버팀목이자 동반자로서 항상 따뜻한 관심과 배려를 보내주신 할아버지께 감사드립니다. 할아버지께서 보여주시는 꾸준함과 세심함은, 앞으로 제가 연구자로서 갖추어야 할 자세로 생각되며, 항상 그러한 모습을 간직할 수 있도록 노력하겠습니다. 높은 연세이신데도 제게 올바른 마음가짐을 가질 수 있도록 몸소 실천하시어 귀감이 되시는 할아버지께 진심으로 존경의 마음을 드립니다. 또한 석사, 박사과정 동안 항상 걱정해 주시고, 믿음으로 지켜 봐 주신 아버지, 어머니, 형에게 따뜻한 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 가족은 제가 나태해질 때마다 다시금 저를 바로 일으켜 세워주는 빛이었습니다. 우리 가족 모두 항상 건강하고 앞으로의 모든 일에서 진심어린 보람과 행복을 느꼈

으면 합니다.

이 작은 지면을 통해 일일이 언급하지는 못 하지만 학문의 의미에 대해 조언해 주시고 관심을 가져 주신 많은 분들께도 감사의 마음을 전합니다.

이 부족하고 작은 결실로 학위과정이 끝나게 되지만 끝이 아닌 새로운 시작이라 생각하며 초심을 잃지 않고 항상 배우려는 마음가짐을 가지는 그런 사람이 되도록 하겠습니다. 감사합니다.

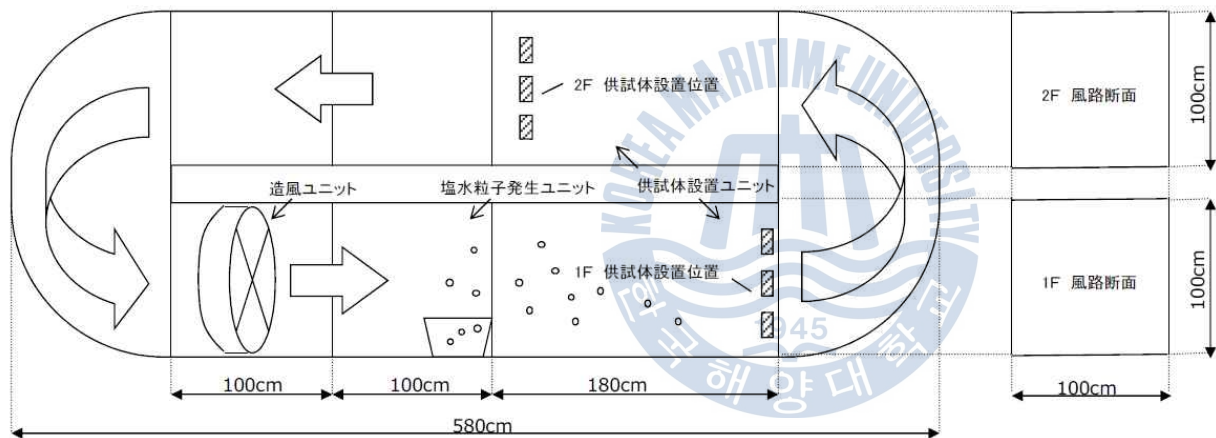
2015년 2월 조규환



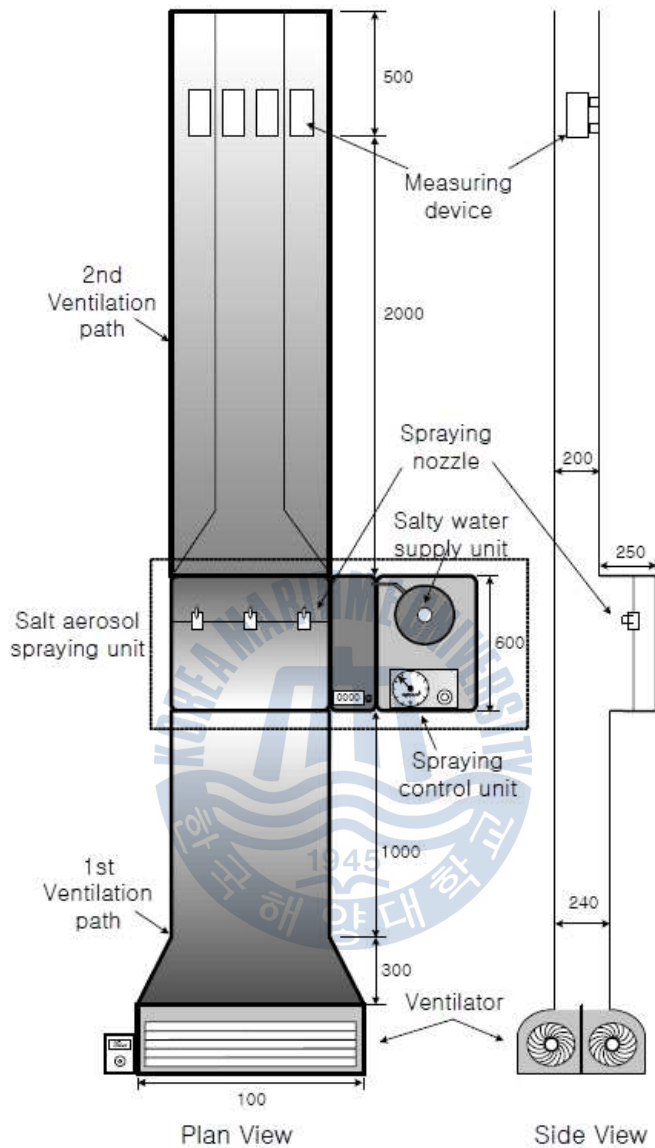
부록

A. 유사 비래염분 시뮬레이터





풍동형시험장치 (青木慶彦, 2010)

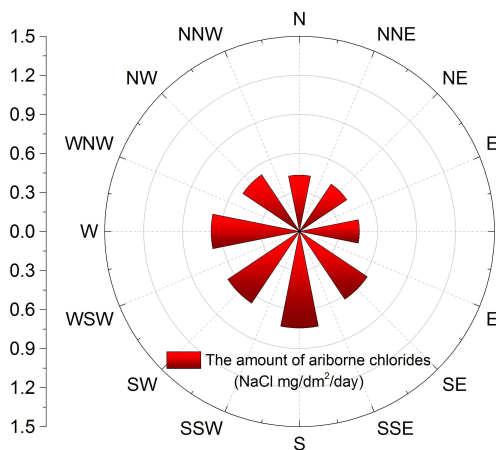


비래염분 포집성능 시험장치 (이종석, 2006)

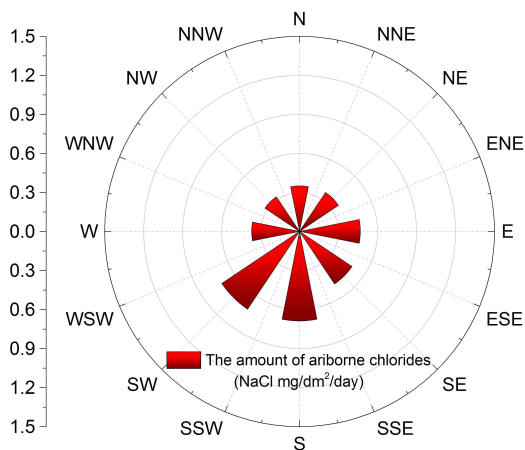


B. 비래염분 데이터

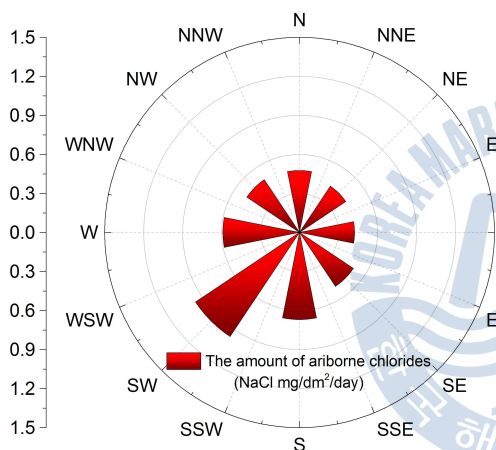




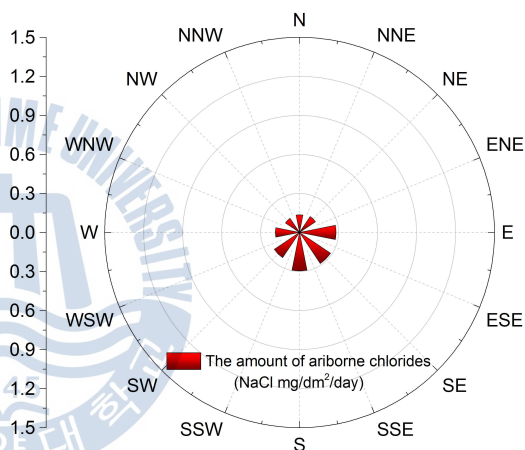
(a) 3월



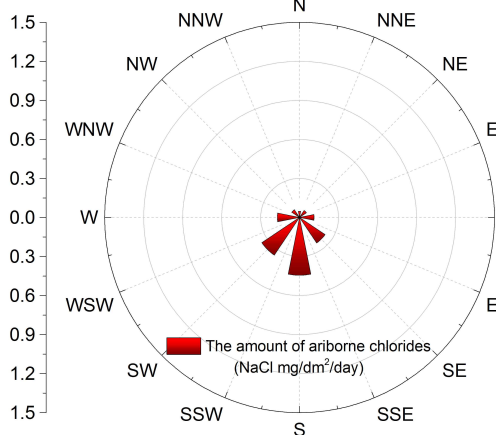
(b) 4월



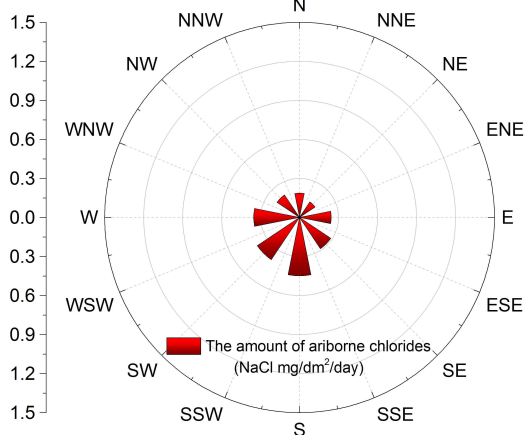
(c) 5월



(d) 6월

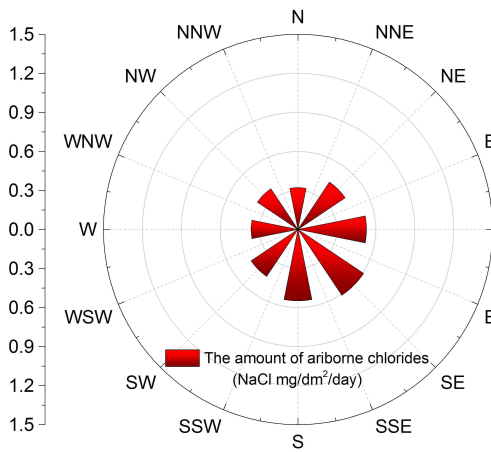


(e) 7월

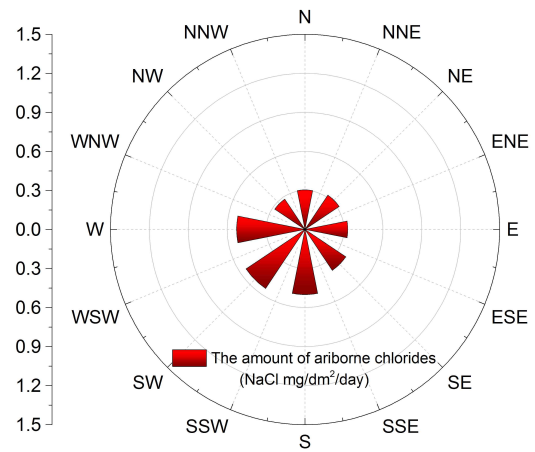


(f) 8월

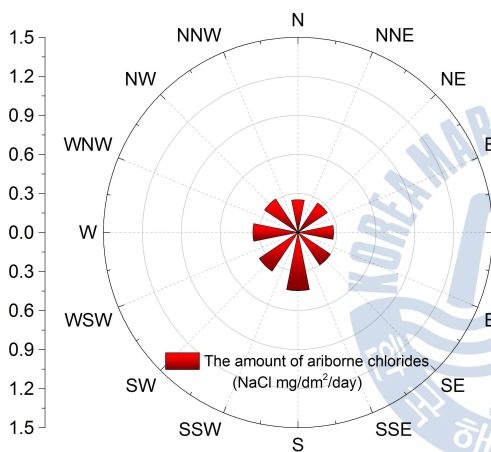
월별 다방향의 비래염분 포집데이터 (Point A / 2011년 3월 ~ 2011년 8월)



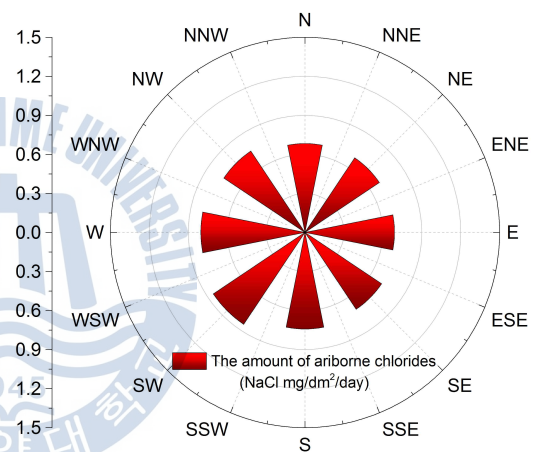
(a) 9월



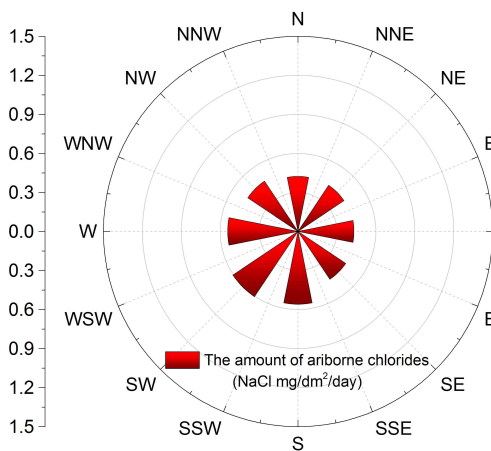
(b) 10월



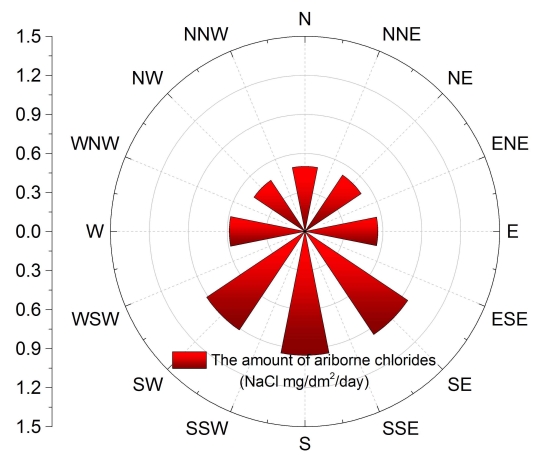
(c) 11월



(d) 12월

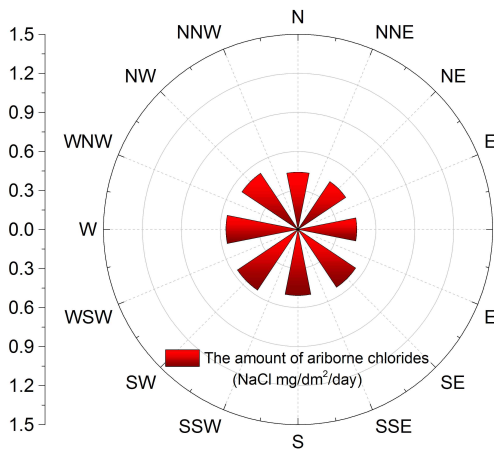


(e) 1월

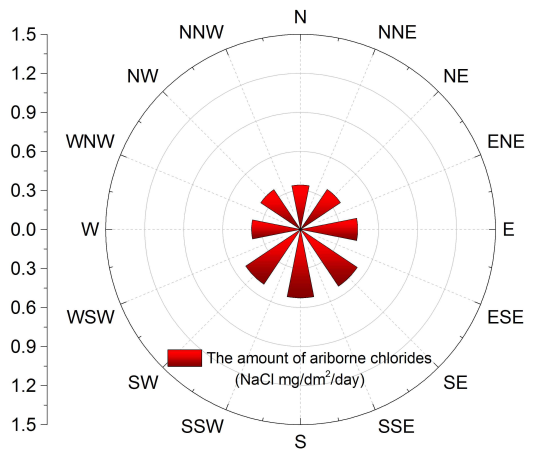


(f) 2월

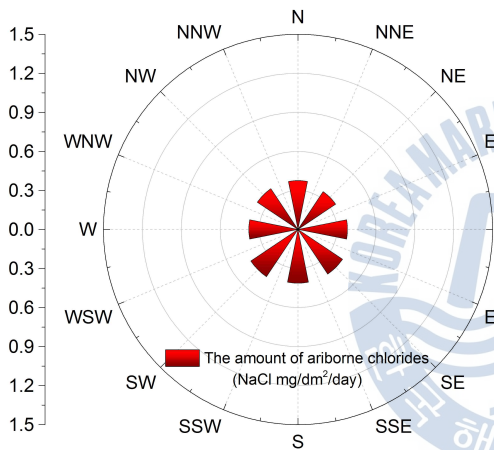
월별 다방향의 비래염분 포집데이터 (Point A / 2011년 9월 ~ 2012년 2월)



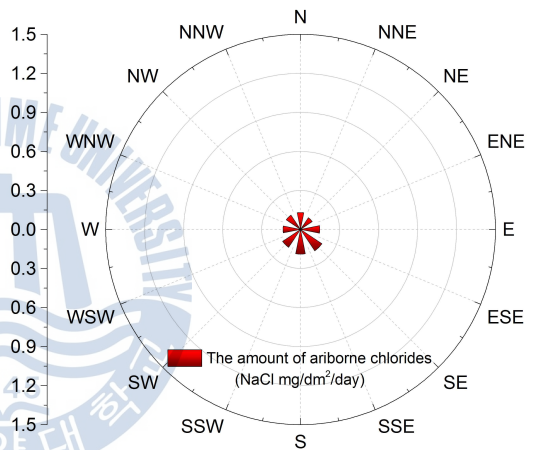
(a) 3월



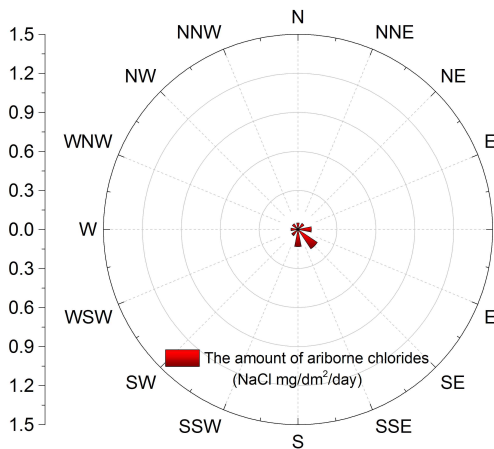
(b) 4월



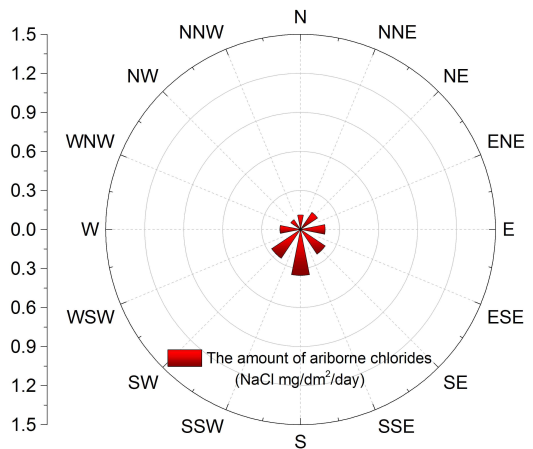
(c) 5월



(d) 6월

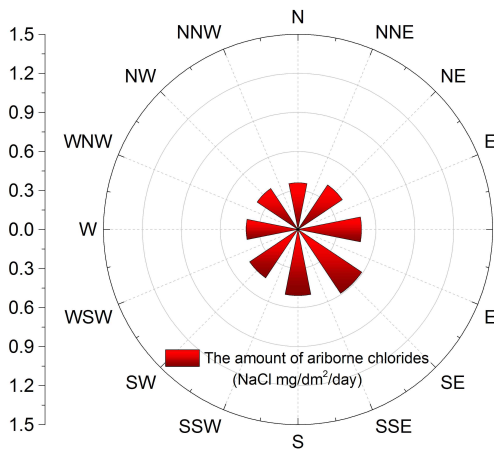


(e) 7월

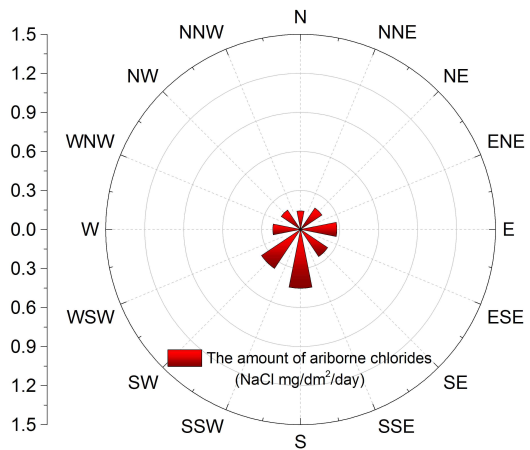


(f) 8월

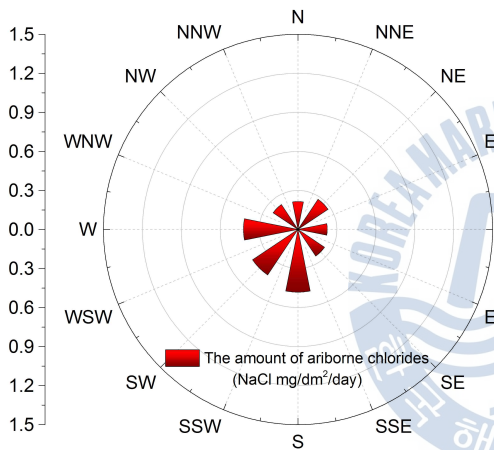
월별 다방향의 비래염분 포집데이터 (Point B / 2011년 3월 ~ 2011년 8월)



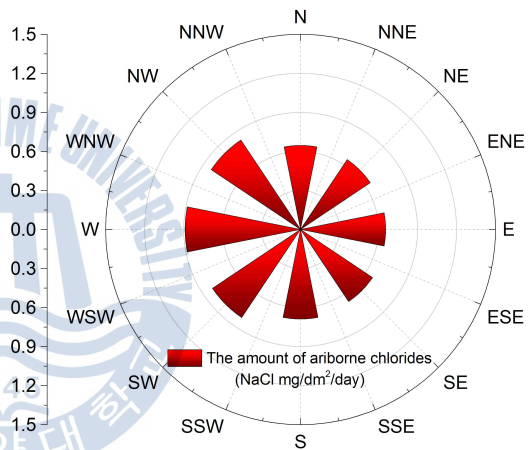
(a) 9월



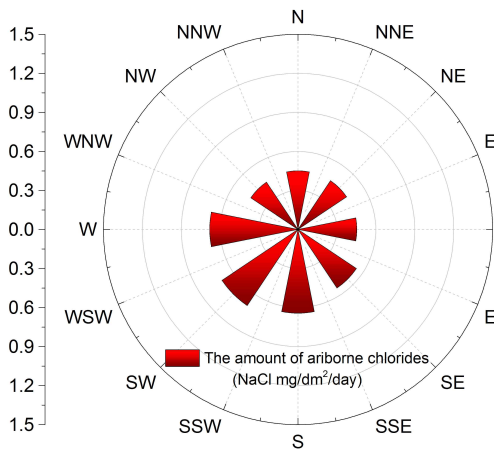
(b) 10월



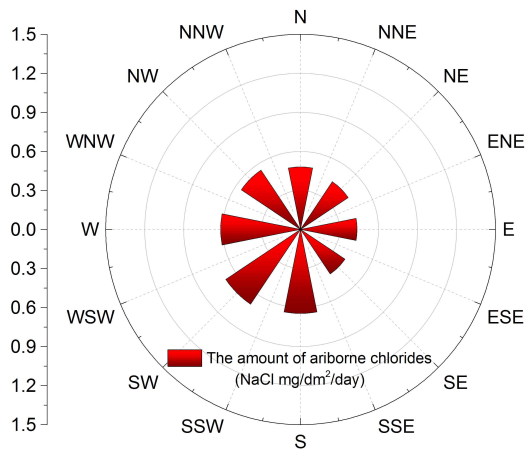
(c) 11월



(d) 12월

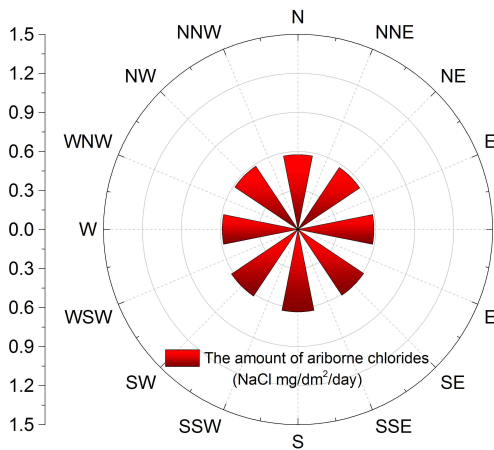


(e) 1월

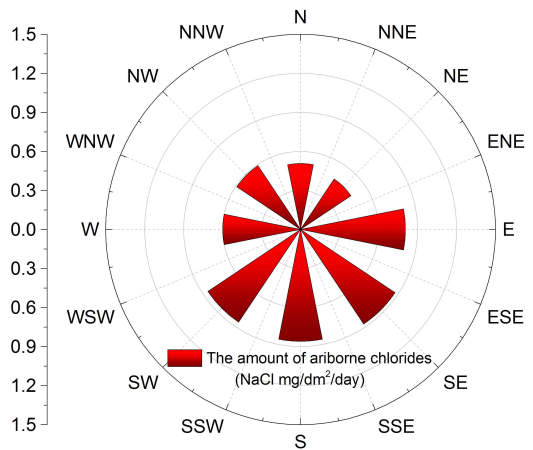


(f) 2월

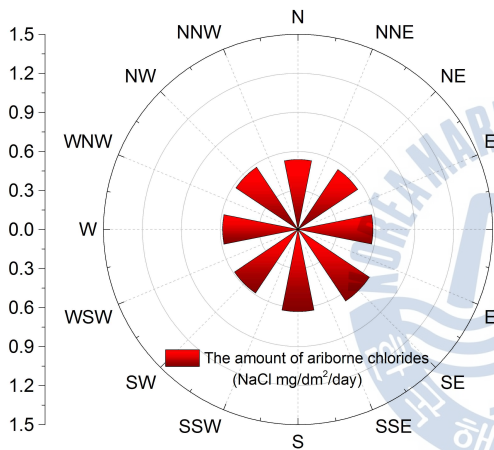
월별 다방향의 비래염분 포집데이터 (Point B / 2011년 9월 ~ 2012년 2월)



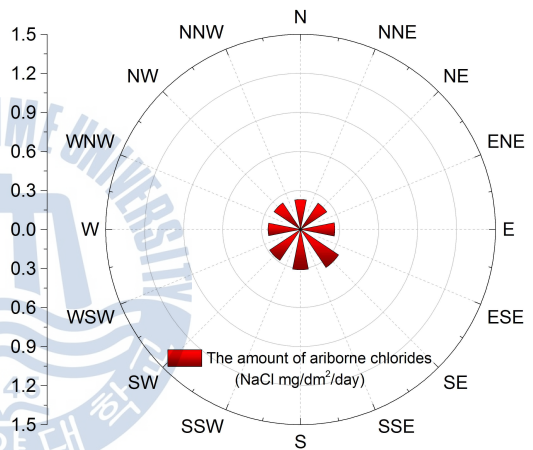
(a) 3월



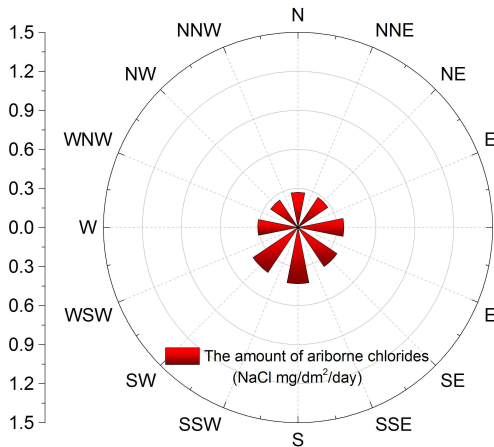
(b) 4월



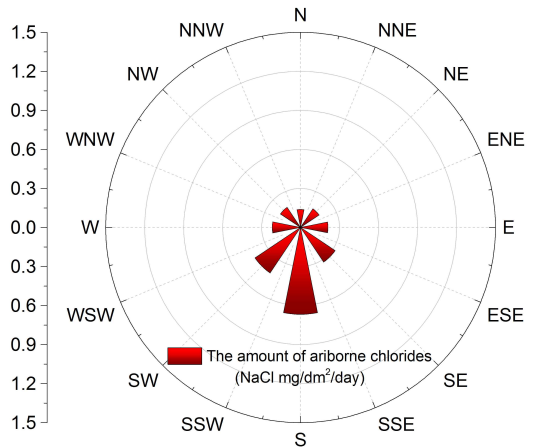
(c) 5월



(d) 6월

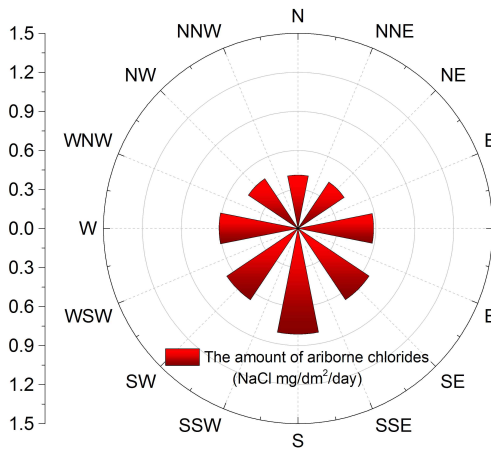


(e) 7월

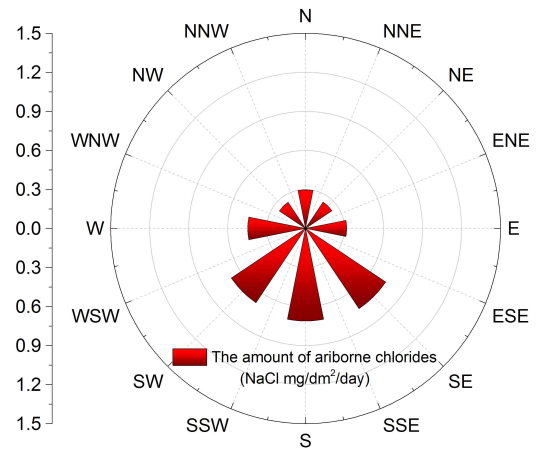


(f) 8월

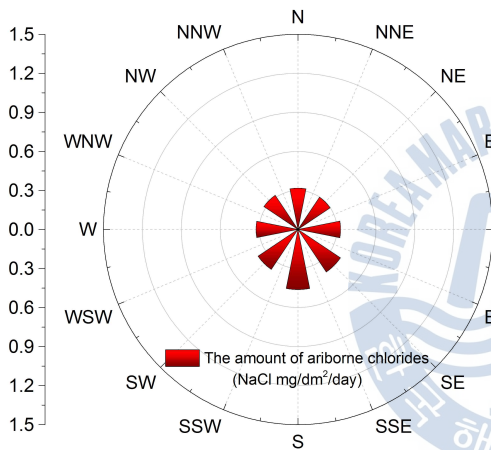
월별 다방향의 비래염분 포집데이터 (Point C / 2011년 3월 ~ 2011년 8월)



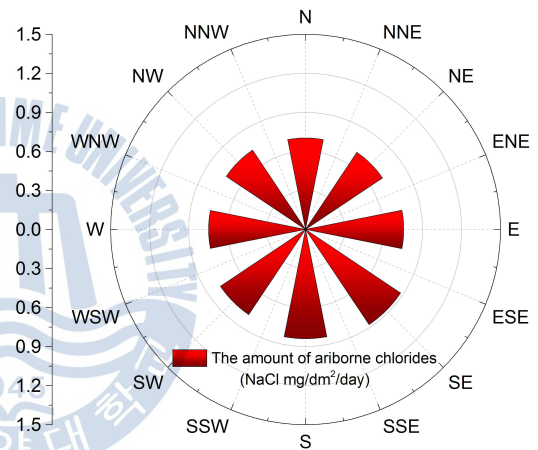
(a) 9월



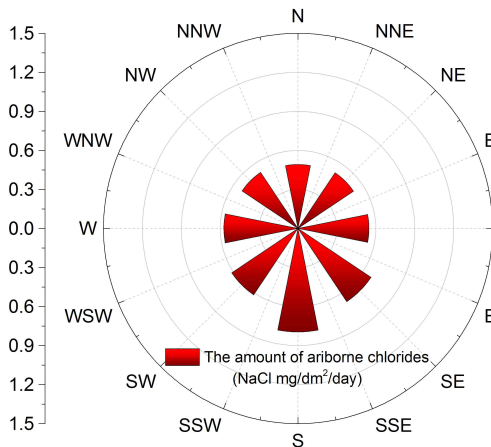
(b) 10월



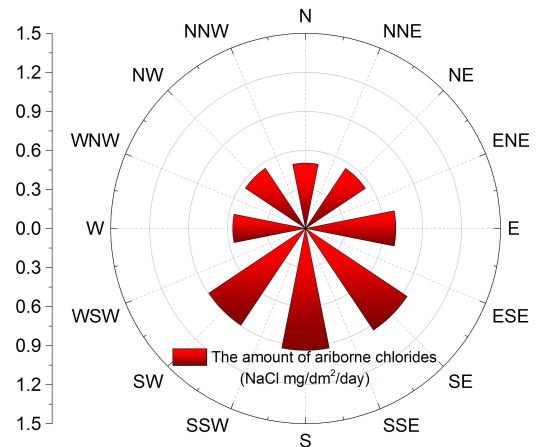
(c) 11월



(d) 12월

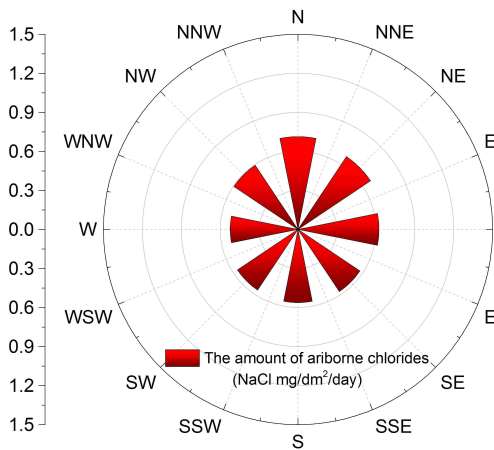


(e) 1월

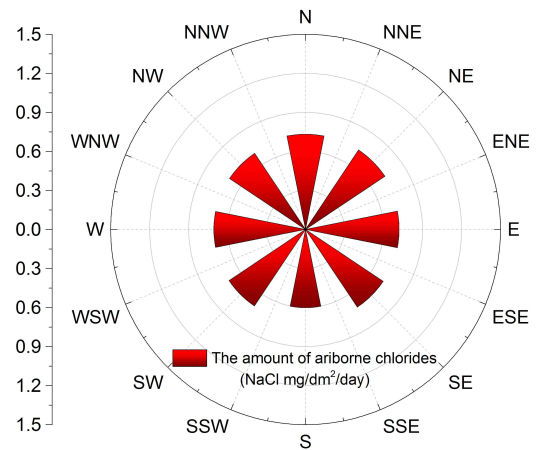


(f) 2월

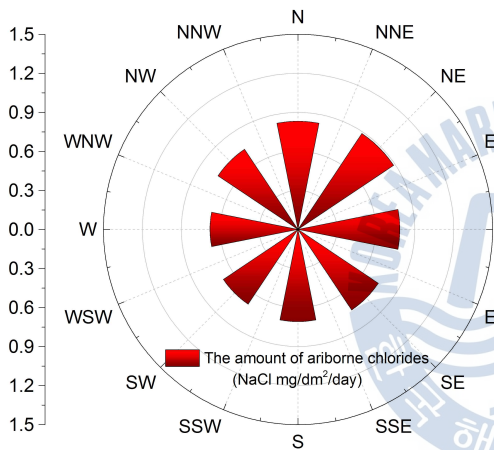
월별 다방향의 비래염분 포집데이터 (Point C / 2011년 9월 ~ 2012년 2월)



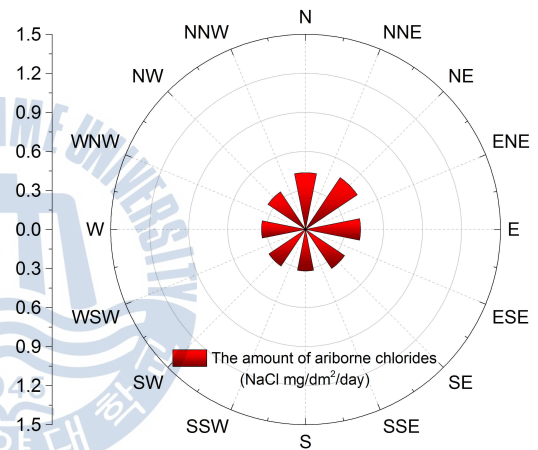
(a) 3월



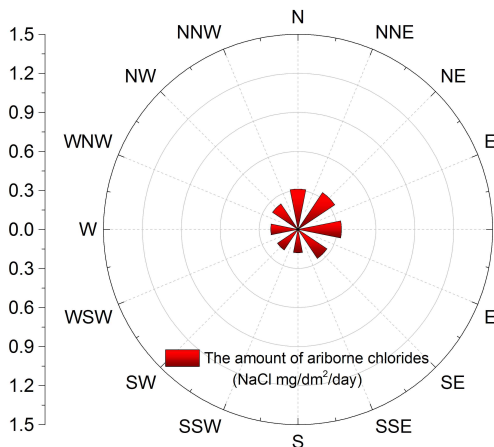
(b) 4월



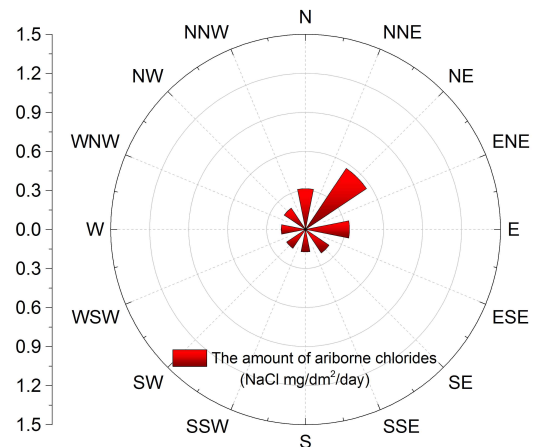
(c) 5월



(d) 6월

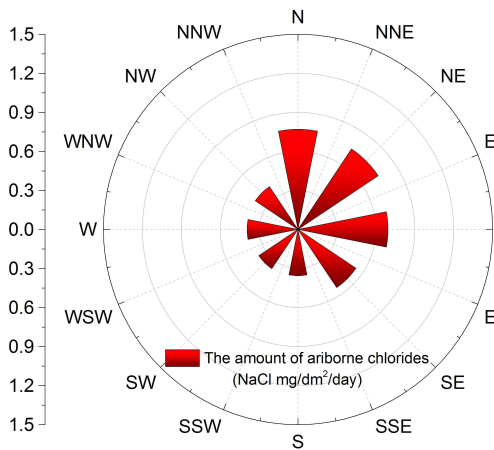


(e) 7월

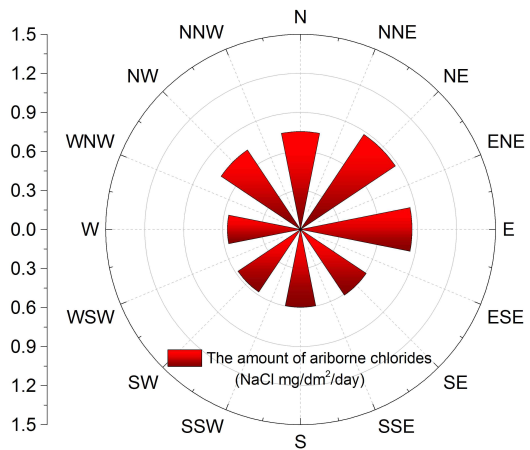


(f) 8월

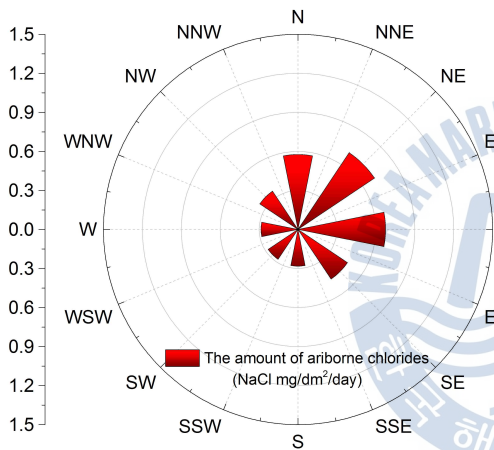
월별 다방향의 비래염분 포집데이터 (Point D / 2011년 3월 ~ 2011년 8월)



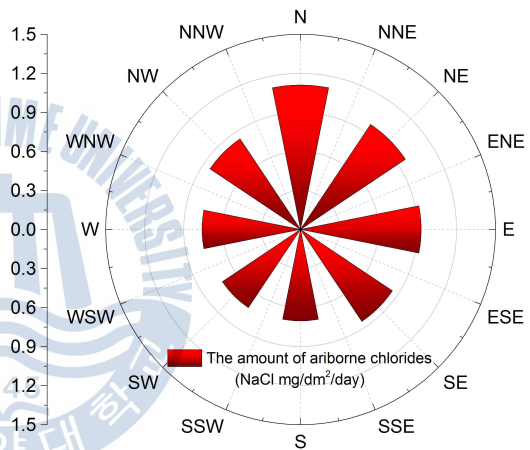
(a) 9월



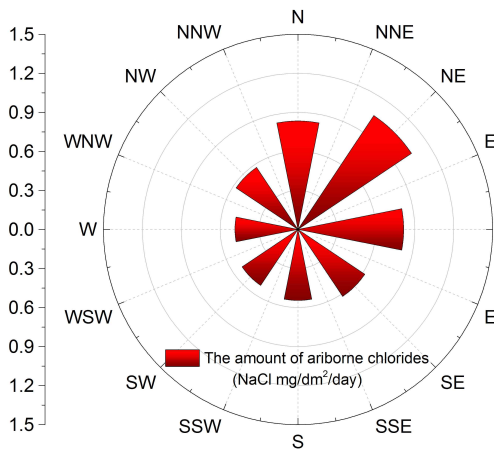
(b) 10월



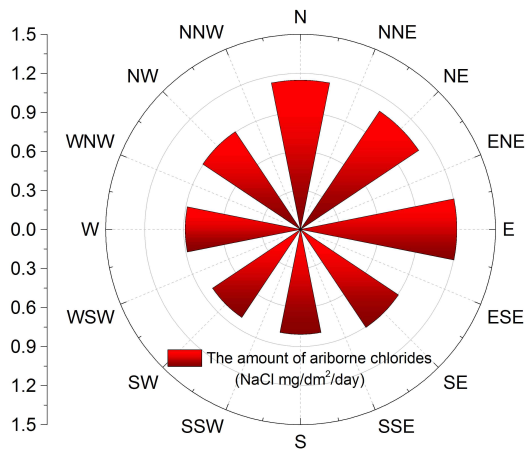
(c) 11월



(d) 12월

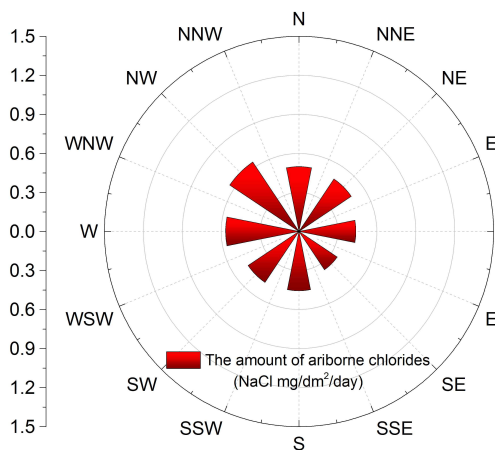


(e) 1월

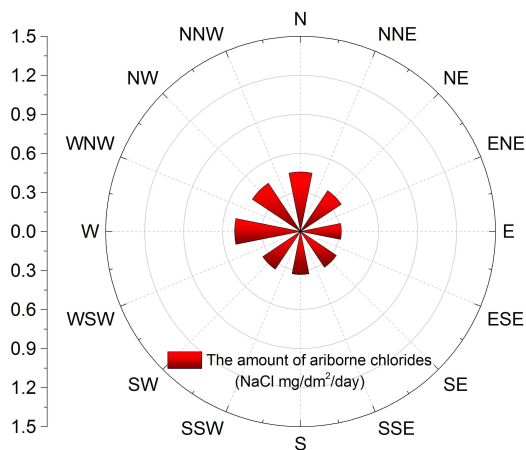


(f) 2월

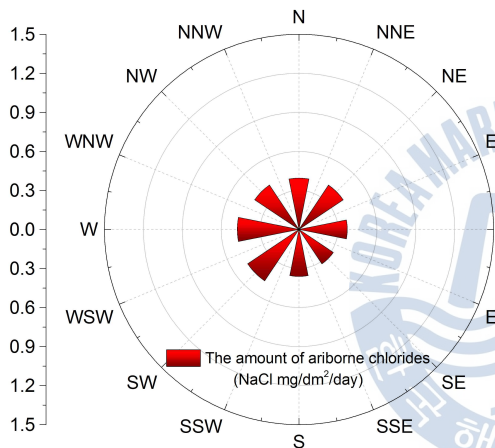
월별 다방향의 비래염분 포집데이터 (Point D / 2011년 9월 ~ 2012년 2월)



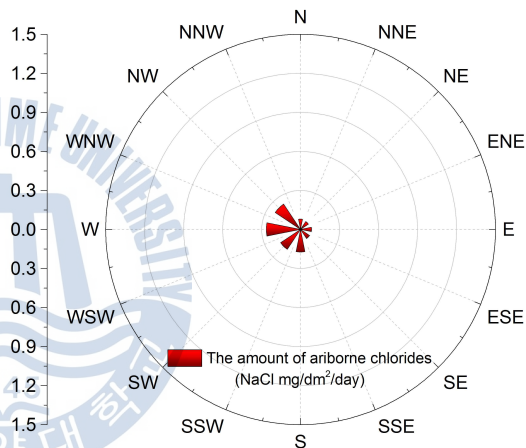
(a) 3월



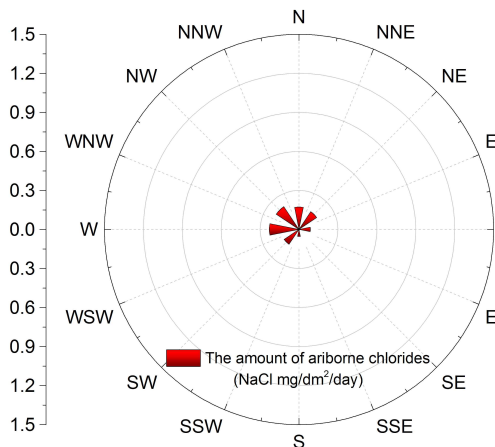
(b) 4월



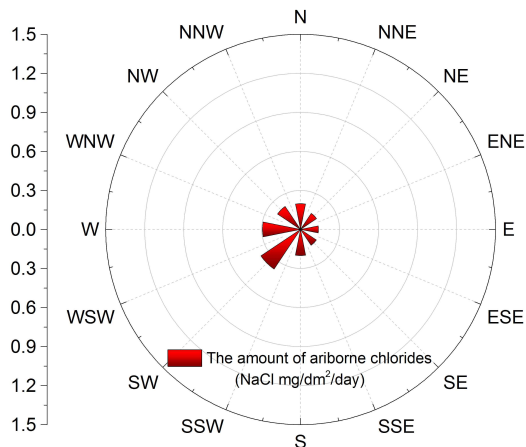
(c) 5월



(d) 6월

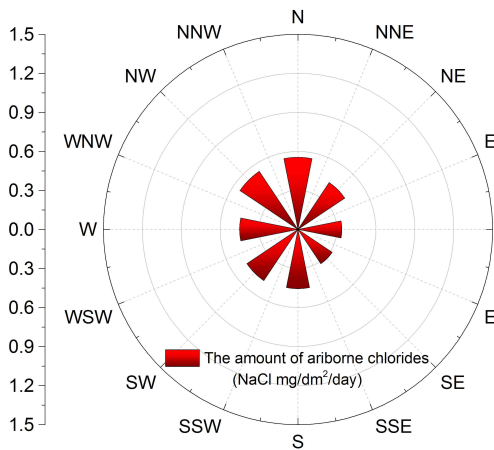


(e) 7월

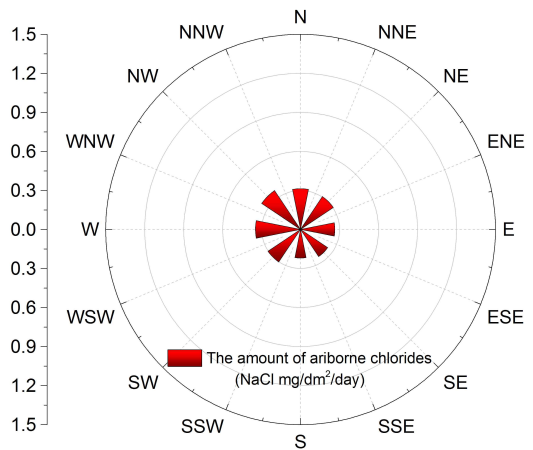


(f) 8월

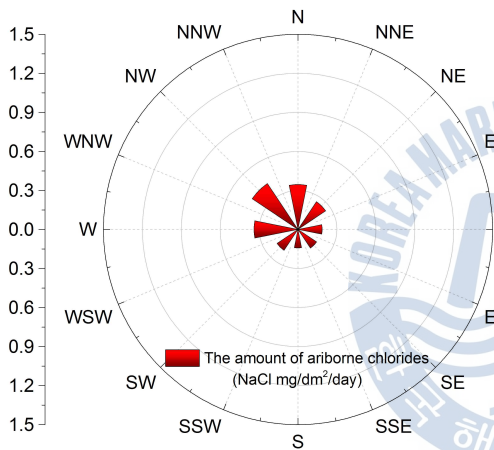
월별 다방향의 비래염분 포집데이터 (Point E / 2011년 3월 ~ 2011년 8월)



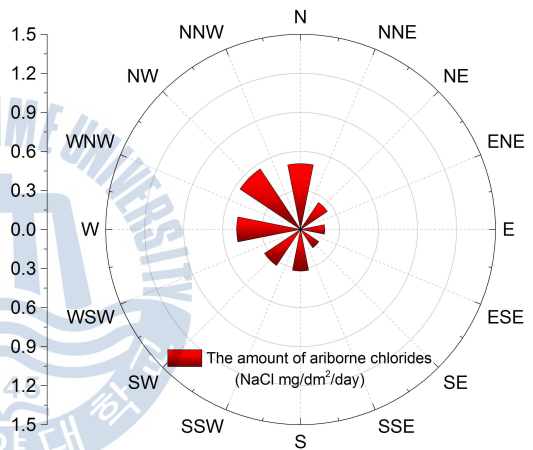
(a) 9월



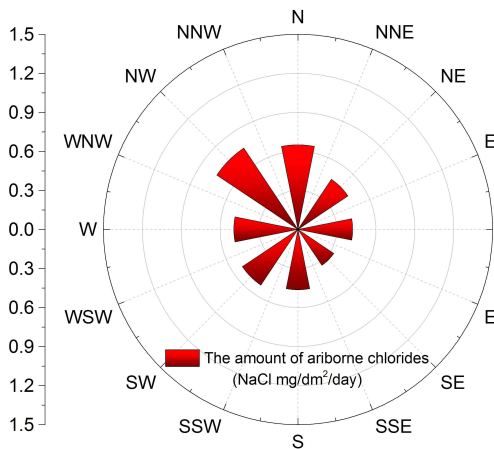
(b) 10월



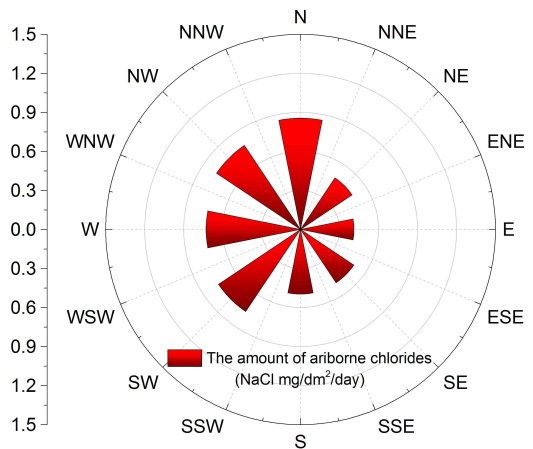
(c) 11월



(d) 12월

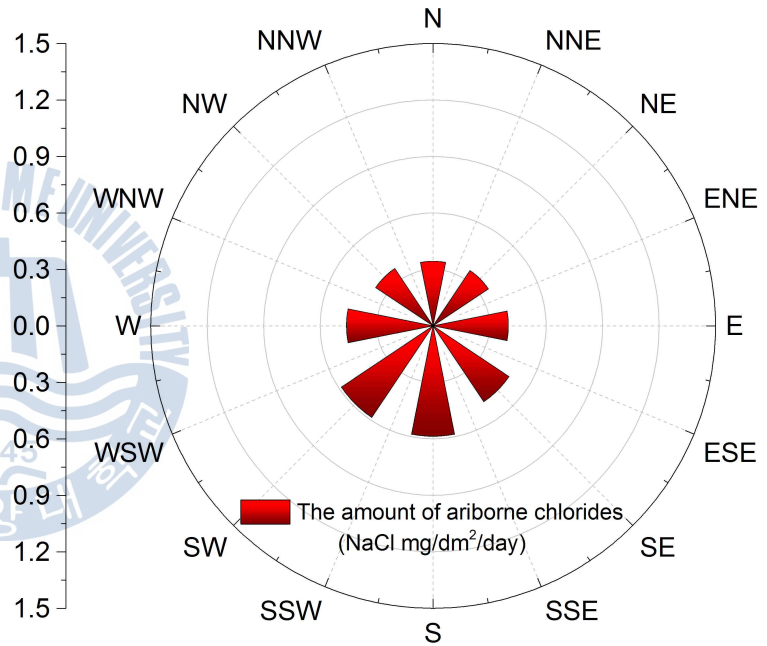
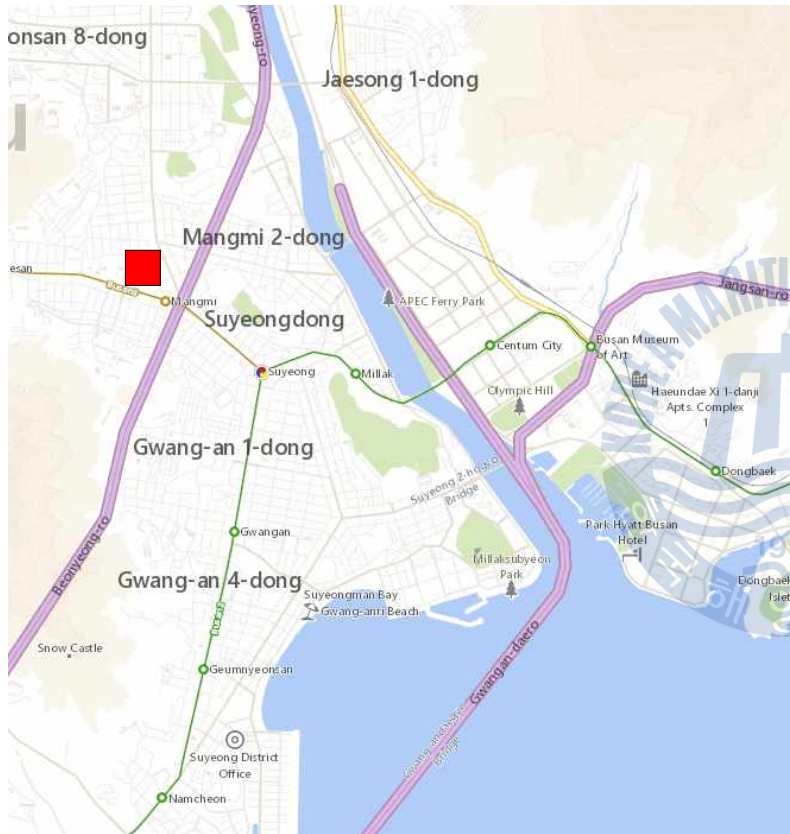


(e) 1월

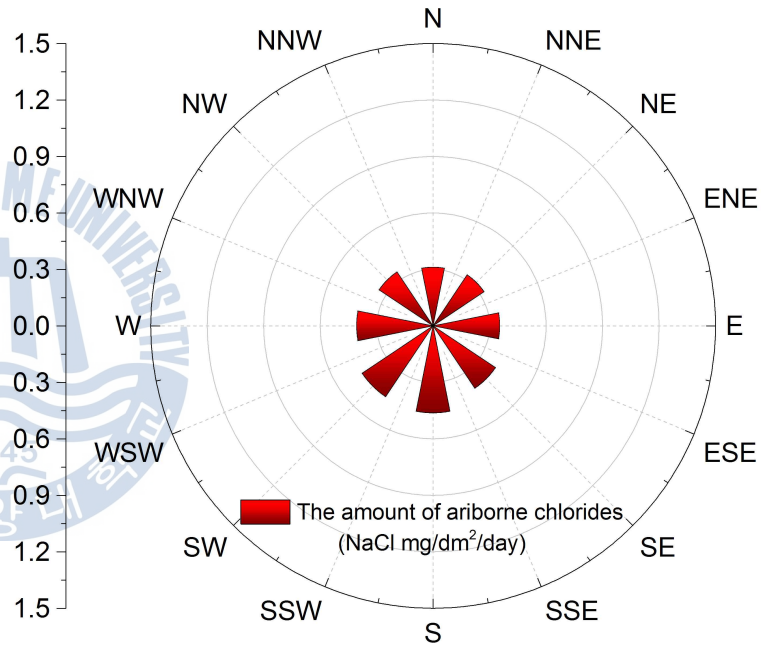
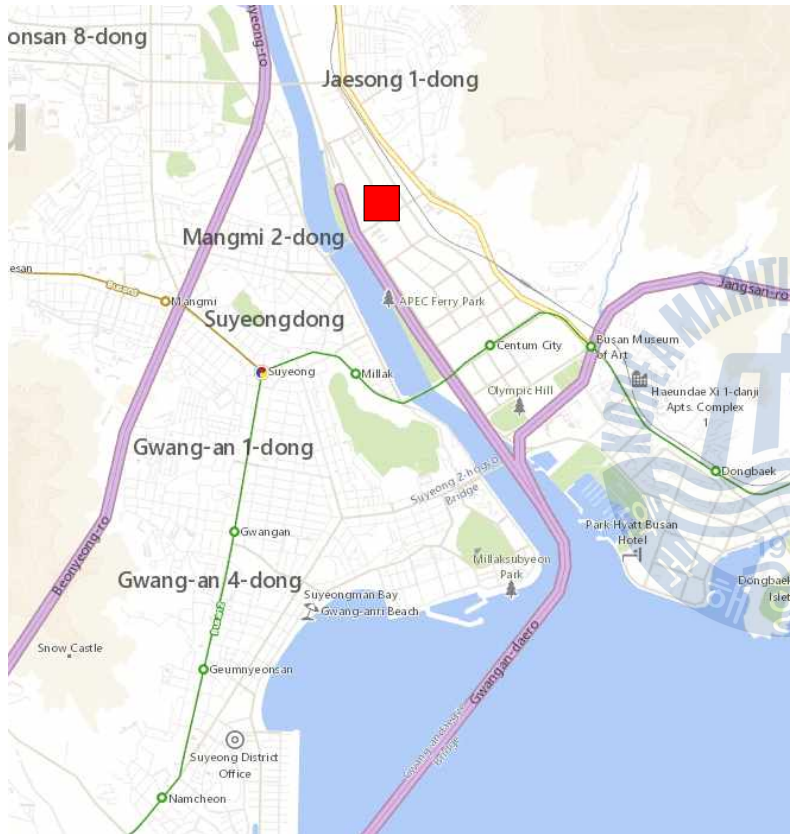


(f) 2월

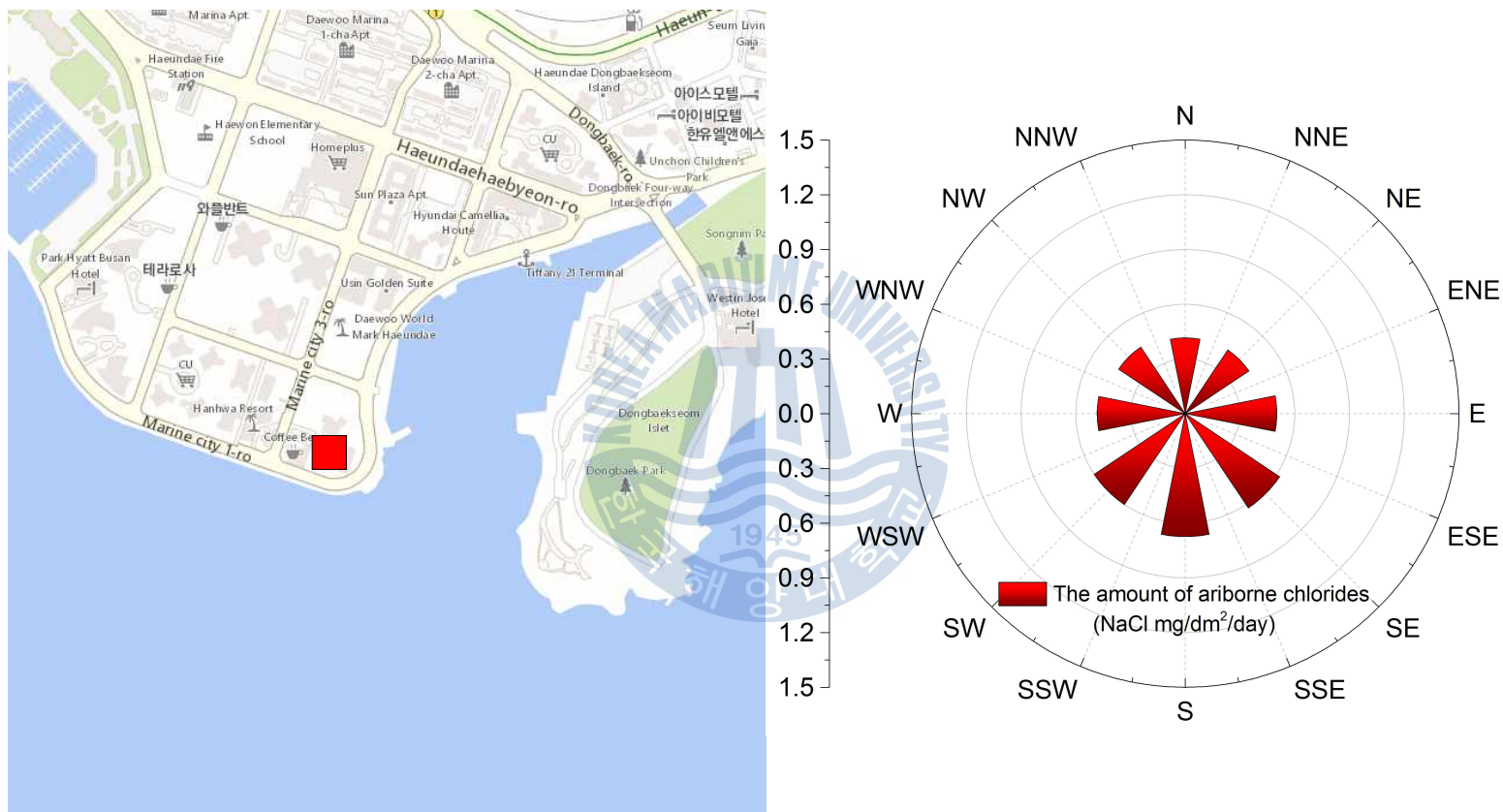
월별 다방향의 비래염분 포집데이터 (Point E / 2011년 9월 ~ 2012년 2월)



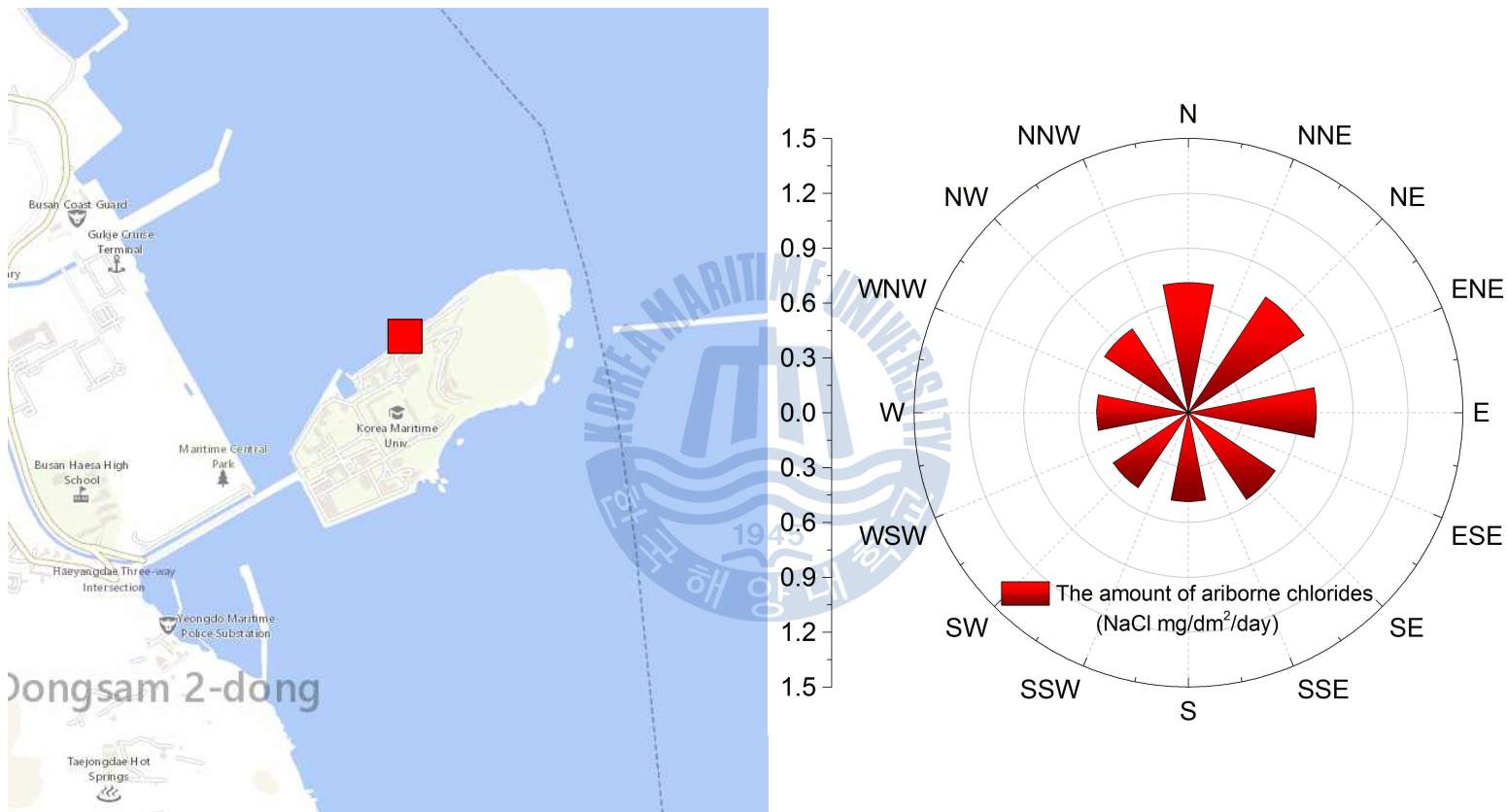
방향별 비래염분 분포 (Point A / 2011년 3월 ~ 2012년 2월동안 각 방향별 평균)



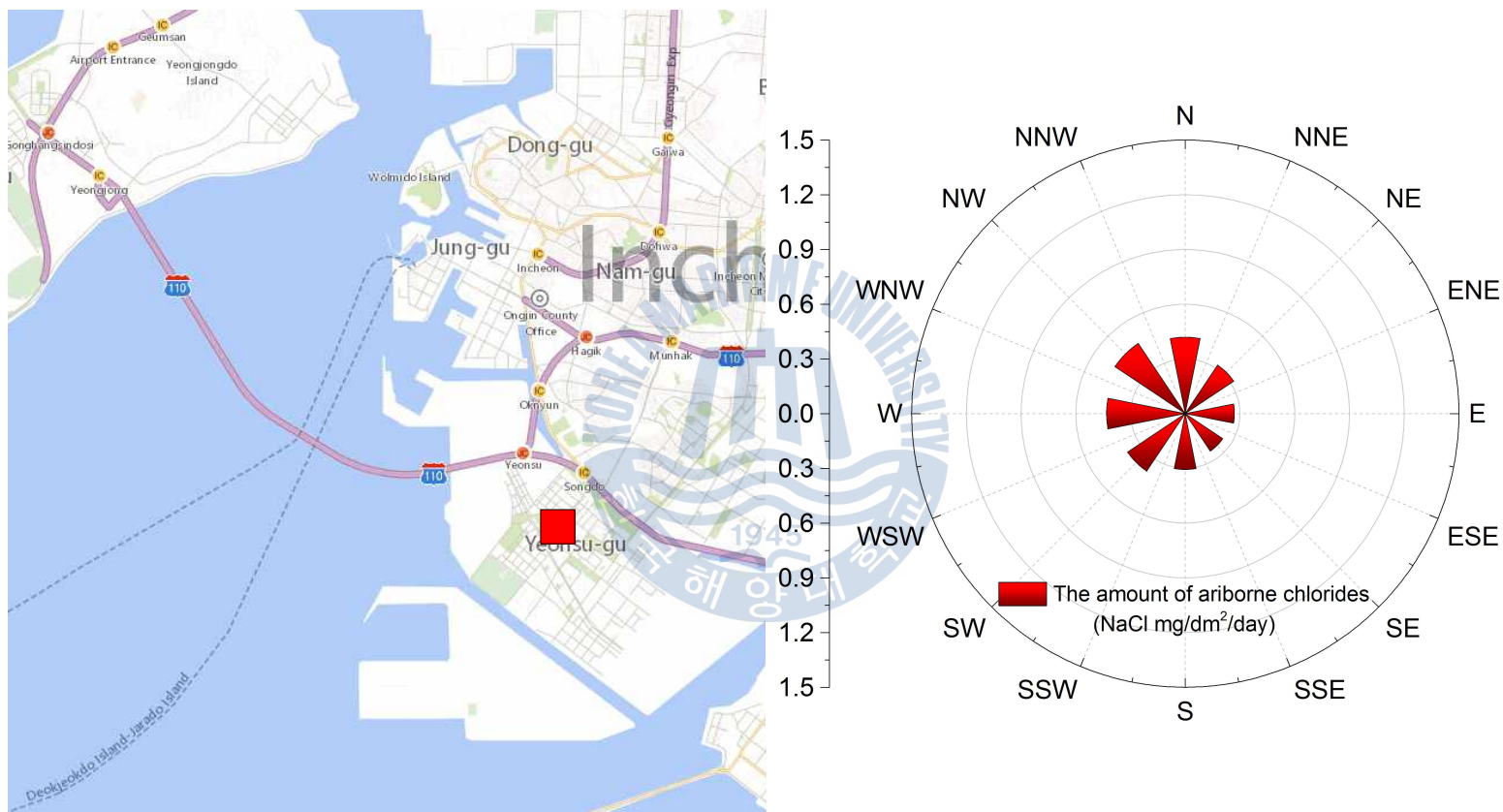
방향별 비래염분 분포 (Point B / 2011년 3월 ~ 2012년 2월동안 각 방향별 평균)



방향별 비래염분 분포 (Point C / 2011년 3월 ~ 2012년 2월동안 각 방향별 평균)



방향별 비래염분 분포 (Point D / 2011년 3월 ~ 2012년 2월동안 각 방향별 평균)



방향별 비래염분 분포 (Point E / 2011년 3월 ~ 2012년 2월동안 각 방향별 평균)

